

激光与光电子学进展

先进节点图案化晶圆缺陷检测技术

刘佳敏^{1†}, 赵杭^{1†}, 吴启哲¹, 冯献瑞¹, 赵翔宇¹, 张震阳¹, 张楚苗¹, 黄涛^{2**}, 朱金龙^{1,3*}, 刘世元^{1,3***}¹华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;²华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;³光谷实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 随着亚 10 nm 集成电路芯片逐步进入消费电子、互联硬件、电子医疗设备等领域,由半导体制造设备所引入的晶圆缺陷对集成电路在良率与价格方面的影响将不断显现,由此带来的对典型缺陷进行高速识别、定位与分类等制造过程控制环节,将变得越来越具有挑战性。传统的晶圆缺陷检测方法包括明场、暗场及电子束成像方法,尽管能够覆盖绝大多数缺陷检测场景,但难以在检测精度、检测灵敏度和检测速度上取得较好的平衡。纳米光子学、计算成像、定量相位成像、光学涡旋、多电子束扫描、热场成像以及深度学习等新兴技术的出现,在提升缺陷灵敏度、分辨率以及对对比度等方面已初步展现出一定的潜力,这为晶圆缺陷检测提供了新的可能性。因此,本综述将从缺陷的可检测性、缺陷检测系统与原理样机、先进图像后处理算法三个方面总结晶圆缺陷检测领域的最新进展,以期对初入该领域的研究人员和跨学科工作者提供一定助益。

关键词 测量; 晶圆检测; 集成电路; 光学检测; 光学成像; 电子束成像; 热场成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222824

Patterned Wafer Defect Inspection at Advanced Technology Nodes

Liu Jiamin^{1†}, Zhao Hang^{1†}, Wu Qizhe¹, Feng Xianrui¹, Zhao Xiangyu¹, Zhang Zhenyang¹,
Zhang Chumiao¹, Huang Tao^{2**}, Zhu Jinlong^{1,3*}, Liu Shiyuan^{1,3***}¹State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;²School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;³Optics Valley Laboratory, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract With the ever-increasing demand for sub-10 nm integrated circuit chips in the fields such as consumer electronics, interconnect hardware, and electronic medical equipment, the impact of wafer defects introduced by semiconductor manufacturing equipment on the yield and price of integrated circuits will continue to emerge, which makes the manufacturing process control such as the high-speed identification, localization, and classification of typical defects more challenging. Although conventional wafer defect inspection methods such as bright-field, dark-field, and electron-beam imaging can cover most defect inspection scenarios, they cannot balance inspection accuracy, sensitivity, and speed. Emerging techniques such as nanophotonics, computational imaging, quantitative phase imaging, optical vortex, multi-beam scanning electron microscopy, thermal field imaging, and deep learning have shown great potential in improving defect sensitivity, resolution, and contrast, which opens up new possibilities for wafer defect inspection. Hence, we make a comprehensive review for the progress in wafer defect inspection from three aspects: the assessment of defect detectability, the diverse inspection methods and prototypes, and the advanced post-processing algorithms. It is expected to help both researchers and interdisciplinary workers who are new entrants in the field.

Key words measurement; wafer inspection; integrated circuits; optical inspection; optical imaging; electron beam imaging; thermal imaging

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-11-16; 录用日期: 2022-11-22; 网络首发日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(52175509, 52130504)、湖北省重点研发计划(2020BAA008)

通信作者: *jinlongzhu03@hust.edu.cn; **huangtao@hust.edu.cn; ***shyliu@hust.edu.cn

[†]共同第一作者

1 引言

智能手机、平板电脑、数字电视、无线通信设施、网络硬件、计算机以及电子医疗设备的广泛普及与应用,不断刺激着全球对半导体芯片的庞大需求^[1]。尽管物联网(IoT)——物物相连的互联网、智能电网、智慧城市及智能制造等仍处于起步发展阶段,但其也极大促进了对半导体芯片的需求。市场的迫切需求和对芯片成本与功耗的极致追求,构成了降低关键尺寸(CD)与增加电路复杂性的主要驱动力^[1-2]。随着行业开始大规模量产亚 10 nm 集成电路(IC)芯片,晶圆制造厂逐渐开始意识到由半导体制造设备所引入的晶圆缺陷对 IC 芯片在良率与价格方面将带来巨大的影响^[3-4],甚至会影响到整个半导体制造的供应链。因此,晶圆缺陷检测系统对晶圆厂商提高产品良率、降低产品价格等方面正变得越来越重要。

晶圆缺陷可分为随机缺陷和系统缺陷^[5]:随机缺陷主要由附着在晶圆表面的颗粒所引起,其位置分布具有一定的随机性;系统缺陷则主要来自光刻掩模和曝光工艺中的系统误差,一般出现在具有亚分辨率结构特征的区域,并且往往位于一片晶圆上不同芯片区域(Die)的同一位置。对于光学检测方法而言,随机缺陷的检测较为简单,其检测可通过同一片晶圆上相邻两个芯片区域光学图像的差分结果直接判断^[6]。而针对系统缺陷,相邻芯片区域的光学图像差分会直接剔除系统缺陷的信号,因此其检测往往不能采用简单的光学图像差分来实现。对于具有天然高分辨率的电子束成像技术而言,无论是随机误差还是系统误差的检测都较为直接,即采用电子束扫描成像后与无缺陷参考图像或数据库比对。需要指出的是:对于裸晶圆而言,晶圆上的颗粒与划痕是缺陷的主要形式并在高频散射分量上具有高灵敏度,因此暗场显微镜等光学检测系统是重要的检测手段^[7];而对于图案化的晶圆,由于图案的复杂性和材料的多样性^[8],其缺陷检测更为复杂也更具挑战(尤其对于光学检测手段而言),因此高精密仪器、先进建模方法以及图像后处理算法在图案化晶圆缺陷检测中的重要性不断凸显。本文在后续内容中将主要聚焦图案化晶圆缺陷检测领域。

一般而言,通过成像来直接看清图案化晶圆缺陷的所有细节是最为直接的方法。目前已有许多方法能够获得亚 10 nm 的分辨率:扫描近场光学显微镜(SNOM)能够实现亚 10 nm 的分辨率^[9-10],然而由于其景深(DoF)比传统远场显微镜小得多,因而对工作距离控制的要求较为严格;多光子与荧光显微术被广泛应用于生物显微领域中^[11-12],但其低光子产量与未知的 DOF 带来了潜在的工程挑战,且所需要的荧光染料与液体环境会对晶圆本身造成污染;原子力显微镜(AFM)是一种非接触式的显微方案,但制造用于 10 nm 以下沟槽缺陷检测所需要的探针具有一定的难

度,且其点扫描成像模式的低检测效率阻碍了其在缺陷检测中的应用^[13-14]。透射电子显微镜(TEM)可以分辨近原子尺度或单原子的结构^[15-16],但其需要真空环境与断面制样,难以作为一种潜在的半导体在线检测工具。因此,目前半导体工业中主要有两种晶圆缺陷检测设备,即电子束和光学远场检测^[17-18]。电子束检测,作为扫描电子显微镜的一种,可以定位和表征尺寸低至数个纳米的微小缺陷^[19],然而其小成像视场极大地影响了检测效率,使之难以应用于在线检测场景。尽管如此,电子束检测以其超高的横向分辨率^[20],依然是晶圆制造厂用于缺陷检测(尤其是缺陷细节成像与缺陷分类)的重要手段之一。光学远场检测的本质是明场显微镜,具有成像视场大、曝光剂量低等显著优点。尽管分辨率受瑞利散射的限制^[21],但对于识别和定位缺陷而言,其关键在于信噪比(SNR)和对比度^[22]。根据瑞利判据,对于直径 d 远小于照明波长 λ 的散射颗粒,其可检测的远场信号与 d^6/λ^4 成正比^[23-24]。而来自成像组件的噪声(如镜头缺陷、机械不稳定性、相机传感器中的散粒噪声、背景暗噪声和读出噪声)和样品本身的缺陷(例如图案中线条的线边粗糙度和线宽粗糙度)会降低图像对比度并覆盖纳米级缺陷的散射信号^[25-27]。然而,缺陷和基底材料之间的光学耦合往往会产生远超瑞利公式的散射信号^[28],尽管缺陷和基底材料之间的光学耦合强度尚且无法通过解析方法推导^[29-31],但在低曝光条件下亦有可能对极小尺度晶圆缺陷进行高灵敏度检测^[32]。此外,由于缺陷(尤其是系统缺陷)的材料通常与图案的材料相同,并且缺陷的特征尺寸远小于照明波长,因此缺陷对比度增强与信噪比增强同等重要。然而,正如上文所述,相邻区域光学图像的直接差分往往会抹除系统缺陷的散射信号(如 Die-to-Die 算法、Cell-to-Cell 算法),导致仅能从原理上保证随机缺陷的检测灵敏度。一种可行的方法是预先获取一个经第三方检测方法(如扫描电镜,尽管耗时较长)检测过的、确保无缺陷的区域光学图像,将该无缺陷区域的光学图像作为参考图像,能够在一定程度上确保系统缺陷的可检测性。但是,系统缺陷本质上来源于掩模或曝光系统的固有缺陷,那么系统缺陷一旦存在,则其会污染整片晶圆上的所有被曝光的芯片区域。另一种方法是通过先进的光学建模算法,在计算机中模拟一个无缺陷区域的光学图像,进而可以将此模拟光学图像作为参考图像(此即为 Die-to-Database 算法)。然而,光学建模方法很难严格模拟各种系统与随机误差,如晶体管结构的真实形貌尺寸、表面粗糙度、光学曝光系统的像差等,并且为了获得足够大视场的模拟光学图像其往往需要庞大的计算资源。近年来发展起来的基于焦深扫描的成像检测系统^[33-35],通过检测系统缺陷引起的局部波前和振幅沿光轴方向的扰动,实现了对存储器阵列的缺陷检测^[36]。由于系统缺陷在形貌和尺寸上与其相邻背景图案不

同,其沿光轴的离焦散射场也与背景图案不同,这是焦深扫描技术可以实现无参考缺陷检测的原因,但焦深扫描检测技术对于逻辑电路缺陷检测的有效性仍然有待验证。从原始光学图像中提取缺陷信息的后处理算法也十分关键,因为缺陷检测本质上是提高 SNR 和对比度的问题。差分、高斯滤波、卷积等诸多常规算法以及发展迅速的深度学习已广泛应用于缺陷检测。

目前,基于深紫外(DUV)光源的光学远场检测技术的灰色区域介于 20~10 nm 之间^[37],将 DUV 检测技术延伸至低于 10 nm 甚至 5 nm 以下会造成更大的误检和漏检率。尽管产业界正从 DUV 往真空紫外(VUV)和极紫外(EUV)波段检测推进^[38-39],但真空腔室的存在不仅增加了系统复杂性,也在一定程度上影响了整个检测过程的效率。此外,材料在短波长下的强吸收效应有可能降低反射率,进而抵消因波长减小而产生的瑞利散射增强效应。因此,图案化晶圆的缺陷检测仍是一个极具挑战性而又亟待解决的前沿方向。本文正是以此为出发点,从传统晶圆缺陷检测、定量相位检测、纳米光子、电子束成像、热场成像、太赫兹检测、极短波长成像、结构光场成像等多个方面全面综述当前晶圆缺陷检测领域的新观点和新趋势,以期对缺陷检测领域的初入研究人员和跨学科工作者有所启迪与帮助。

2 晶圆缺陷可检测性

在实际 IC 芯片生产线上的晶圆缺陷检测是高度自动化、批量化、高效率的工艺流程,其不仅依靠先进的检测设备,也依赖于合理的检测配方^[40]。而检测设备的系统设计与检测方案的参数设置均离不开晶圆缺陷可检测性的预先评估,即预先判定感兴趣晶圆缺陷能否被可靠定位和识别。溯本追源,晶圆缺陷可检测性的评估通常离不开晶圆缺陷检测策略(如 Die-to-Die、Cell-to-Cell 和 Die-to-Database 等)的物理本质——“信号处理与分析”:针对有缺陷区域和无缺陷区域的图像(光学空间像或电子束空间像)开展差分计算,利用此差分结果定量评估晶圆图案中缺陷特征的散射信号强度,通过将此散射信号强度与预定义的阈值进行比较,最终实现缺陷特征的可靠定位与识别^[41-42]。那么,怎样利用差分结果量化缺陷特征的散射信号强度、如何选择合适的预定义阈值共同构成了晶圆缺陷散射信号的评价准则,同时也决定了缺陷可检测性评估结果的客观程度,这将是本小节首先综述的内容之一。其次,仅从晶圆缺陷本身考虑,影响晶圆缺陷可检测性的因素主要有两类:材料对比度与拓扑形貌。前者是晶圆上背景图案材料和缺陷材料的光学常数差异,后者则包含了背景图案结构和缺陷特征的尺寸、缺陷类型、背景图案形态等,这是本小节内容阐述的另一重点。

2.1 晶圆缺陷可检测性评价准则

鉴于评估晶圆缺陷可检测性的实验检测方法存在成本高昂、工作繁琐、实验条件苛刻等问题,晶圆缺陷可检测性的预先评估大多采用建模仿真与信号分析相结合的方法来实现。建模仿真的目标在于晶圆空间像的可靠计算,那么针对光学远场检测技术的空间像计算模型仍然是沿用计算光刻中的部分相干成像模型^[43],如 Abbe 成像模型和 Hopkins 成像模型^[44-45]。鉴于计算光刻所涉及成像建模理论与方法已被深入、细致地研究,具体可参考中国科学院上海光学精密机械研究所王向朝研究员与李思坤研究员^[46-47]、北京理工大学李艳秋课题组和马旭课题组等的相关工作^[48-49],与此相关的建模细节在此不作赘述。本文所涉及与晶圆缺陷可检测性评价相关的仿真计算工作,主要是基于作者及所在课题组自主开发的晶圆空间像仿真工具而开展的。

实际上,大尺寸晶圆缺陷是通过直接成像来分辨的,小尺寸晶圆缺陷依靠图像差分来识别和定位。以图 1(a)所示 90 nm 尺寸桥接缺陷为例,其空间像能够直接反映出缺陷的形态与位置,而图 1(b)、(c)、(d)所示的空间像难以说明缺陷存在与否,此时比较可靠的做法是根据图 1(f)、(g)、(h)所示空间像差分来甄别缺陷。上述方法的依据在于:缺陷特征的散射信号强度显著不同于空间像或空间像差分中的背景信号。然而,此类空间像差分结果并不总是有效的:如果缺陷尺寸进一步收缩至更小尺寸,其差分信号有可能小于噪声信号的置信区间临界值,此时将难以以 100% 置信水平来区分缺陷信号与噪声信号,最终造成缺陷误检率增加、正确率下降。由此可知,缺陷信号的评价准则以及可被检测的缺陷最小尺寸是缺陷可检测性研究的焦点之一。

为了更便捷地研究晶圆缺陷的可检测性,研究者们借鉴了测量科学中的灵敏度概念^[50-51],即“测量方法及时响应待测物理量变化的能力”,提出了缺陷检测灵敏度这一概念,以定量评估检测方法所具备的最小尺寸缺陷的检测能力。也就是,所能识别的晶圆缺陷尺寸越小,该检测方法的检测灵敏度越高。目前,在晶圆缺陷检测领域,缺陷散射信号的信噪比通常用于反映缺陷检测灵敏度,即缺陷散射信号强度与噪声幅度的比值,其能够可靠地揭示空间像和空间像差分中缺陷特征的显著程度,以及反映缺陷检测结果的置信水平。实际上:当缺陷尺寸较大时,晶圆上背景图案的散射信号难以遮盖缺陷特征的散射信号,此时缺陷特征的散射信号与空间像中背景噪声之间的差异是甄别缺陷的依据;当缺陷尺寸较小时,晶圆上背景图案的散射信号会遮盖缺陷特征的散射信号,即缺陷可被视为晶圆图案的电磁散射行为中的一个微扰,此时空间像差分能够尽可能地消除晶圆上背景图案的散射信号,那么空间像差分结果中缺陷特征的信号强度与空间像差分中

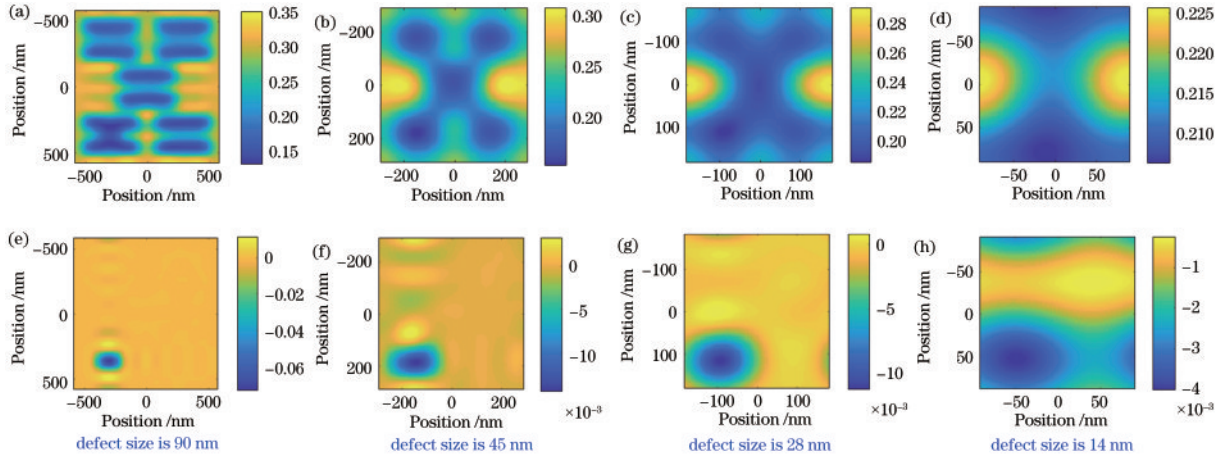


图 1 具有不同尺寸桥接缺陷晶圆图案的空间像与空间像差分。(a) 90 nm 桥接缺陷的 90 nm 线宽晶圆图案的空间像;(b) 具有 45 nm 桥接缺陷的 45 nm 线宽晶圆图案的空间像;(c) 具有 28 nm 桥接缺陷的 28 nm 线宽晶圆图案的空间像;(d) 具有 14 nm 桥接缺陷的 14 nm 线宽晶圆图案的空间像;(e) 90 nm 桥接缺陷的空间像差分;(f) 45 nm 桥接缺陷的空间像差分;(g) 28 nm 桥接缺陷的空间像差分;(h) 14 nm 桥接缺陷的空间像差分

Fig. 1 Aerial images and the corresponding differential images of patterned wafer with bridge defects in different sizes. (a) Aerial image of patterned wafer with 90 nm bridge defect in 90 nm CD; (b) aerial image of patterned wafer with 45 nm bridge defect in 45 nm CD; (c) aerial image of patterned wafer with 28 nm bridge defect in 28 nm CD; (d) aerial image of patterned wafer with 14 nm bridge defect in 14 nm CD; (e) differential image of patterned wafer with 90 nm bridge defect; (f) differential image of patterned wafer with 45 nm bridge defect; (g) differential image of patterned wafer with 28 nm bridge defect; (h) differential image of patterned wafer with 14 nm bridge defect

的噪声幅度之间的差异是甄别缺陷的依据。简言之,引入缺陷散射信号的信噪比能够可靠地区分缺陷特征和噪声。同时,缺陷散射信号的信噪比可作为品质因数来评估材料对比度、拓扑形貌等因素对缺陷检测灵敏度的影响。

目前缺陷散射信号的信噪比评估方法已得到充分的研究,其中代表性的研究成果是由三星电子、英特尔、美国国家标准与技术研究院等团队所取得的^[52-57]。韩国三星电子的 Lee 等^[52-53]将检测实验中缺陷散射信号的信噪比定义为 $R_{\text{SNR}} = \text{Max}(|D_{ij} - \mu|) / \sigma$, 其中 D_{ij} 为空间像差分结果中缺陷区域内第 i 行、第 j 列像素的光强大小, μ 和 σ 分别是空间像差分结果中非缺陷区域内光强的平均值与标准差。同时,他们将理论仿真中的缺陷信号信噪比定义为 $R_{\text{SNR}} = (S_{\text{D}} - S_{\text{N}}) / N_{\text{total}}$ ^[53], 其中 S_{D} 和 S_{N} 分别是缺陷模型和无缺陷模型中探测器的光强, N_{total} 为考虑了散粒噪声、系统噪声、工艺变化和粗糙度的总噪声。他们利用这两类评价法则研究了照明光束的偏振态对 SRAM 芯片中的缺陷检测灵敏度的影响, 并且理论仿真与实验在部分缺陷可检测性评估方面取得了定性的一致性。与之对比, 韩国三星电子的 Yang 等^[54]采用 $R_{\text{SNR}} = (L_{\text{background level}} - D_{\text{defect level}}) / L_{\text{background level}}$ 这一法则来评估缺陷对比度, 并利用此评估法则研究了各种照明光瞳配置条件下亚 20 nm 桥接缺陷的可检测性, 最后采用基于 KLA 29XX 设备的检测实验结果证实了仿真所预测的最佳照明光瞳配置。日本东芝公司的 Fujii 等^[55]采用缺陷对比度来评估缺陷散射信号, 其表达式为 $C_{\text{contrast}} = (S_{\text{defect}} - S_{\text{background}}) /$

$(S_{\text{defect}} + S_{\text{background}})$, 并且约定如下法则: 如果缺陷对比度是非零的且是可被探测的, 那么此缺陷是可被检测的。此评价法则主要用于分析放大或缩小缺陷散射信号的影响机制。美国英特尔公司的 Crimmins^[25]建立了归一化缺陷信号的评价法则 $S_{\text{N}} = \text{Max}(D_{\text{diff image}}) / \text{Mean}(N_{\text{non-defect image}})$, 其中 $D_{\text{diff image}}$ 表示空间像差分, $N_{\text{non-defect image}}$ 表示无缺陷区域的空间像。他们利用此评价规则定性研究了缺陷散射信号随技术节点、光波长、缺陷类型的变化规律。与此同时, 美国国家标准与技术研究院的研究团队针对缺陷可检测性的评价法则进行了持续的探索^[56-59]。美国国家标准与技术研究院 Barnes 等^[56]采用空间像差分结果的平均光强、归一化的空间像差分结果的平均光强作为品质因素, 来分析照明偏振态、照明光瞳形状对桥接缺陷可检测性的影响规律。随后, 针对所提出的三维 (3D) 体积缺陷检测方法, 他们采用体积差分图像中的子空间容量与光强来共同作为缺陷的散射信号定性评价准则^[57-58], 并结合拓扑结构的三维连续性规则来区分缺陷与噪声。同时, 他们也建立了定量的评价准则 $R_{\text{SNR}} \approx I_{\text{defect}} / \sigma_{\text{noise}}$ ^[58], 其中 I_{defect} 表示缺陷子体积的平均光强, σ_{noise} 表示噪声子体积内光强的标准差。另外, 在利用晶圆缺陷的形序双折射行为开展晶圆缺陷检测研究中, 他们仍然采用 $R_{\text{SNR}} \approx I_{\text{defect}} / \sigma_{\text{noise}}$ 来评估缺陷的可检测性, 只是 I_{defect} 与 σ_{noise} 来源于两次阈值处理后的空间像差分图像^[59]。除此之外, 针对 EUV 掩模缺陷检测应用所建立的缺陷信号信噪比评估准则也是值得关注的。美国加州大学伯克利分校的 Wang 等^[60-62]建立了基于光子绝对值的缺

陷信噪比评估法则 $R_{SNR} = S_{\text{signal}} \times P_{\text{photon}} / \text{Sqrt} \{ B_{\text{background}} \times P_{\text{photon}} + S_{\text{signal}} \times P_{\text{photon}} + N_{\text{camera noise}} + [\text{Std}(R_{\text{roughness}}) \times P_{\text{photon}}]^2 \}$ 和其简化形式 $R_{SNR} = S_{\text{defect signal}} / (N_{\text{speckle noise}} + N_{\text{shot noise}} + N_{\text{camera noise}})$, 其中 Sqrt 和 Std 分别表示平方根算子与标准差算子, 此类法则细致地考虑了影响缺陷信号信噪比的主要噪声源。瑞士保罗谢勒研究所 Mochi 等^[63-64] 在采用反射式 EUV 掩模扫描无透镜成像显微镜 (RESCAN) 开展 EUV 掩模缺陷检测时建立了缺陷信号的强度评估法则 $R_{SNR} = (I_D - I_A) / \text{Std}(A)$, 其中 I_D 和 I_A 分别表示缺陷区域与整个图像的平均光强值, $\text{Std}(A)$ 表示整个图像中光强值的标准差, 此评估法则可靠地评估了不同尺寸突出缺陷的可检测性。

在上述研究工作的启发下, 作者也建立了相应的缺陷可检测性评价法则, 用于缺陷检测灵敏度影响因素的分析, 具体公式^[65] 表示为

$$R_{SNR} = \frac{\text{Max}(I_{\text{diff}}) / \text{Mean}(I_{\text{non}})}{3\sqrt{2} \times N_{\text{shot}} / F} \geq 1, \quad (1)$$

式中: I_{diff} 和 I_{non} 分别为空间像差分和无缺陷图案的空间像; N_{shot} 和 F 分别是光学远场检测设备中延时积分 (TDI) 相机的散粒噪声与满阱容量。因子 3 用于充分考虑置信水平, 引入因子 $\sqrt{2}$ 则是为了充分地评估 TDI 相机中的总噪声幅度。如果 $R_{SNR} > 1$, 则表示晶圆缺陷能够被此光学检测设备所识别, 且置信水平约 99.7%。值得强调的是, 构建上述晶圆缺陷可检测性评价法则的初衷来源于为缺陷检测灵敏度仿真分析提供便捷的分析依据, 从而获取可靠的检测灵敏度变化曲线, 进而为实际检测提供可参考的合理检测配置条件。因此, 将上述评价规则直接作为缺陷检测实验中的缺陷判定条件时, 还需更深入地统计学分析, 但是, 将上述评价规则作为缺陷可检测性仿真分析的缺陷判定条件是足够可靠的。

2.2 材料对比度的影响

空间像差分所反映的缺陷散射信号, 可采用与微球散射问题相关联的米散射理论进行合理地定性估计^[66]。如果微球尺寸远小于照明光波长, 则微球散射信号可进一步采用米散射理论中的特殊情形——“瑞利散射”^[67] 进行定量评估,

$$I_{\text{defect}} = \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \right) \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{|N|^2 - 1}{|N|^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6 I_0, \quad (2)$$

式中: θ 为入射角; R 为观测点与散射体之间的距离; λ 为光的波长; I_0 为入射光的强度; N 和 d 分别是散射体的复折射率和直径。该瑞利散射公式可作为深亚波长尺度缺陷散射信号强度的定性评估模型, 其也被称为启发式模型^[68]。该定性评估模型表明, 缺陷散射光强随缺陷尺寸减小而呈现六次幂减小, 也随波长减小而呈现四次幂增大。

与此同时, 对于亚波长和深亚波长尺度的晶圆背

景图案, 如果图案材料不具有本征各向异性, 其散射信号强度可采用具有形序双折射行为的层状结构的反射特性和偏振响应特性进行近似估计^[69]。相应地, 晶圆背景图案的散射信号 I_{pattern} 依赖于 P 偏振的等效复折射率 N_P 、S 偏振的等效复折射率 N_S 和基底的复折射率 N_{sub} , 表示为

$$I_{\text{patter}} \propto f(N_P, N_S, N_{\text{sub}}) = f \left[\sqrt{\frac{aN_1^2 + bN_2^2}{a+b}}, \sqrt{\frac{(a+b)N_1^2 N_2^2}{aN_2^2 + bN_1^2}}, N_{\text{sub}} \right], \quad (3)$$

式中: N_1 和 N_2 分别是晶圆图案中线条介质和空隙介质的复折射率; a 和 b 分别是线条和空隙的宽度。P 偏振表示入射光的偏振方向平行于线条方向, S 偏振表示入射光的偏振方向垂直于线条方向。

晶圆背景图案的散射信号, 不仅主导了无缺陷图案的平均光强, 也主导了散粒噪声的幅度, 因此空间像差分难以完全消除晶圆背景图案的散射信号影响。根据式 (2) 和式 (3) 所示的定性评估模型可知: 缺陷散射信号的信噪比依赖于光波长、缺陷材料复折射率、图案材料复折射率、基底材料复折射率、缺陷尺寸、图案结构尺寸、图案结构形态等因素; 图像对比度则主要依赖于远场光学检测设备的光学分辨率, 以及缺陷材料复折射率、图案材料复折射率和基底材料复折射率这三者之间的差异性。针对缺陷材料与图案材料相同这一备受关注的晶圆制造工艺缺陷检测场景, 影响缺陷检测灵敏度的主要因素将简化为光波长、缺陷与基底材料复折射率差异、缺陷与图案结构尺寸、图案结构形态。进一步地, 当光波长减小时, 检测设备的光学分辨率会相应增加, 高图像对比度将更易实现。然而, Barnes 等^[59] 的研究工作已经证实, 如果缩减光波长使得缺陷与基底材料的复折射率差异变小, 则会造成图像对比度和缺陷散射信号信噪比减小, 此时缩减光波长并不会改善缺陷检测灵敏度。因此, 光波长的合理选择也需要考虑尽量放大缺陷与基底材料的复折射率差异。

图 2 总结了 IC 芯片与器件中广泛使用的典型材料的体材料复折射率 $N = n - ik$ 、法向入射条件下的反射率 R 和趋肤深度 δ , 其中复折射率来源于 Palik 等^[70-71] 的研究工作。当缺陷材料与晶圆背景图案材料之间体材料复折射率差异越大时, 其法向反射率差异也会越大, 从而缺陷与晶圆背景图案之间的良好图像对比度越容易实现, 缺陷散射信号的良好信噪比也越容易被保证, 那么图 2(a)~(c) 可用于探测波长或探测光谱范围的合理筛选。同时, 图 2(c) 所示法向反射率对比曲线有助于最佳检测光谱的快速筛选, 尤其是避免探测光的光谱包含某些异常点, 即避免缺陷与基底或背景图案表现出相同法向反射率的波长点。例如, Si 基底上 Cu 图案的异常波长点是 $\lambda = 390 \text{ nm}$, Si 基底上 Co 图案的异常波长点是 $\lambda = 330 \text{ nm}$, Si 基底上 Ni 图

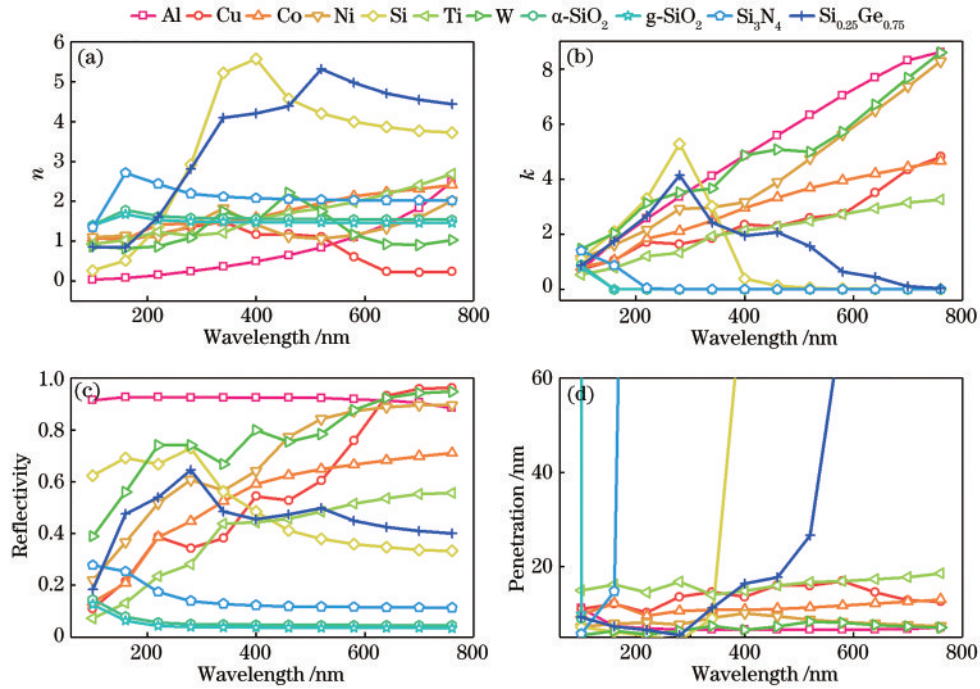


图2 材料光学特性的对比结果。(a)折射率;(b)消光系数;(c)法向反射率;(d)趋肤深度

Fig. 2 Comparison results of optical properties of various materials. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient; (c) normal reflectivity; (d) penetration depth

案的异常波长点是 $\lambda=310\text{ nm}$, Si_3N_4 基底上 Cu 图案的异常波长点是 $\lambda=170\text{ nm}$ 。同时,在这些异常波长点附近,基底或背景图案与缺陷之间的法向反射率差异是极微小的,那么缺陷散射信号的信噪比以及图像对比度均会比较小。相反,如果检测光谱或检测波长远离这些异常点,那么缺陷特征也将更容易被检测出来。以 Si 基底上金属层图案中缺陷检测为例(对于 28 nm 及以下先进节点,可能是 Si 基底上 Cu 图案或者 Si 基底上 Co 图案),鉴于 430~500 nm 波段内法向反射率显著大于 330~410 nm 波段内法向反射率,容易推断出 430~500 nm 波段光谱更适于检测该金属层内的缺陷。同时,根据 290~340 nm 光谱范围内的法向反射率差异性,也容易推断出在 Si 基底上 Cu 图案中的缺陷比 Si 基底上 Co 图案中的缺陷更容易检测。因此,材料对比度能够显著地影响缺陷检测灵敏度。鉴于实际 IC 芯片中各图案层的厚度并非无穷大,选择层状薄膜的反射率计算模型来估计晶圆图案的光强信号是更合理的,那么图 2(a)和图 2(b)所示复折射率对比结果、图 2(d)所示趋肤深度对比结果将发挥重要的指导作用。而且,对于典型存储芯片中的深埋缺陷,材料趋肤深度的对比结果是选择恰当检测波长或光谱的重要依据。此外,根据图 2(d)所示结果可知,一些材料的趋肤深度随波长变化而发生显著变化,即当波长改变时可以从非透明介质转变为透明介质。例如,通过选择 500 nm 以上的光波长或光谱, Si 的透明度将显著增加,此时 Si 基底或 Si 图案所贡献的背景信号和晶圆噪声能够被显著地抑制,这将极大地提高缺陷散射信号

的信噪比,进而改善缺陷检测灵敏度。

为更直观地说明最佳检测光谱的筛选,以 Si 基底上 Cu 图案中的颗粒缺陷检测为例。图 3 展示了不同光谱范围对应的缺陷检测灵敏度仿真结果。根据图 2 所示的结果可推断,360~410 nm 光谱范围所对应的缺陷散射信号信噪比最低,但图 3 却展示了 360~450 nm 光谱范围对应于最小的缺陷散射信号强度,这是受光源的色散特性和探测器的量子效率曲线的影响所造成的。由图 3 可知,360~450 nm 光谱范围对应的缺陷散射信号强度显著地低于 460~580 nm 光谱范围对应的缺陷散射信号强度,那么前者所对应的缺陷可检测性也显著低于后者所对应的结果。这说明,尽管

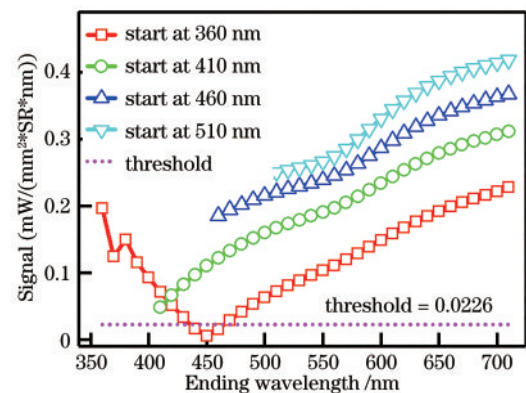


图3 Si基底上Cu图案中缺陷散射信号强度随光谱范围的变化

Fig. 3 Scattering signal intensity of defects in the Cu pattern on a Si substrate under the varying spectral range

前一个光谱范围能够产生更高的光学分辨率和更强的缺陷散射信号,但由于缺陷散射信号相对于背景散射信号仅是微扰,并且更重要地是,图像对比度在前一个光谱范围内明显更弱,从而造成缺陷在前一个光谱范围内难以被检测。同时从图 3 可知,当起始波长 $\lambda_{\text{starting}}$ 固定为 360 nm 时,伴随截止波长 λ_{ending} 从 370 nm 增加至 710 nm,缺陷散射信号强度先减小后增加,其局部最小值位于 $\lambda_{\text{ending}}=450$ nm 处,并且此局部最小值小于 TDI 相机总噪声所决定的阈值信号强度 0.0226。当起始波长 $\lambda_{\text{starting}}$ 固定为 410 nm 时,缺陷散射信号强度随截止波长的增加而线性增加,所有缺陷散射信号强度均大于阈值信号强度 0.0226。因而,这些结果证实了基于材料光学特性差异性分析的缺陷可检测性分析方法的有效性。值得强调的是,缩减检测光谱中的波长并不一定能改善缺陷检测灵敏度,这与 Barnes 等^[59]所报道的结果相似。在他们报道的结果中, $\lambda=47$ nm 所实现的缺陷检测灵敏度优于 $\lambda=13$ nm 所实现的缺陷检测灵敏度,这归因于图像对比度随波长缩减的显著恶化。以上结果表明,缺陷可检测性不仅受光学成像分辨率的影响,也受到图像对比度、信噪比的影响。而且,鉴于光学缺陷检测的目标是识别和定位缺陷,而非“看清”缺陷,因此搜寻能够保证高图像对比度和信噪

比的优异光谱范围比单纯提高光学分辨率更重要。这对于先进技术节点制造工艺中的缺陷检测尤为关键^[3]。

2.3 晶圆拓扑形貌的影响

由缺陷尺寸、缺陷类型、背景图案结构尺寸、背景图案形态所构成的晶圆拓扑形貌也是能够显著影响缺陷散射信号信噪比与图像对比度的关键因素之一^[58-59, 72]。实际上,图 1 所示不同尺寸桥接缺陷的空间像与空间像差分结果已直观地揭示了缺陷尺寸、背景图案结构尺寸对缺陷可检测性的影响。与此同时,式 (1) 的启发式模型也定性地揭示了缺陷散射信号强度对缺陷尺寸六次幂的依赖性。当缺陷尺寸减少时,缺陷散射信号强度会急剧减弱,甚至会小于噪声幅度,这就是深亚波长尺寸晶圆缺陷难以被检测的根本原因。需要说明的是,在当前大多数缺陷检测灵敏度仿真研究中,缺陷尺寸通常被设置为与晶圆图案中线宽相等^[68],此类简化处理的初衷在于关注晶圆缺陷检测中的关键缺陷,即能够对 IC 制造工艺造成毁灭性损坏的缺陷,而这些关键缺陷的尺寸往往与图案结构中的线宽是大致相当的。本文所涉及仿真工作中,也将缺陷尺寸设置为与图案中线宽相同,相应的仿真结果如图 4 所示。

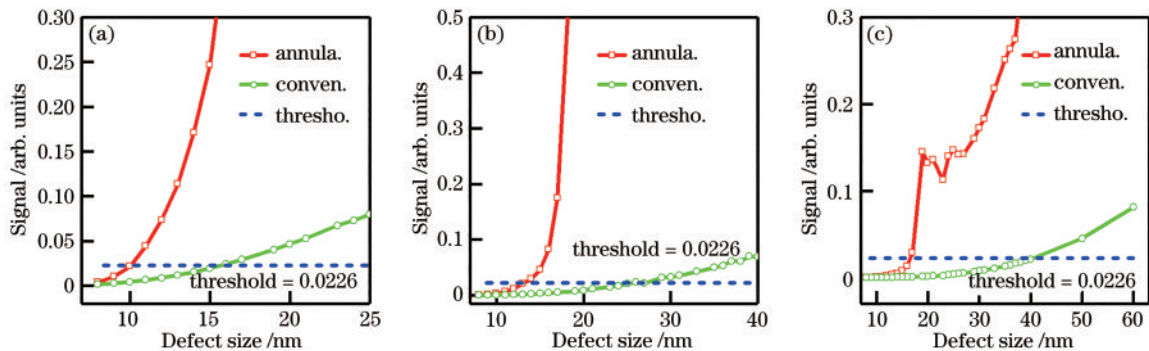


图 4 常规照明和环形照明配置下的缺陷散射信号强度。(a)桥接缺陷;(b)断线缺陷;(c)颗粒物缺陷

Fig. 4 Scattering signal intensity of defects under conventional and annular illumination configurations. (a) Bridge defect; (b) cutting-line defect; (c) particle defect

图 4 展示了缺陷散射信号强度随缺陷尺寸收缩的变化规律:当缺陷尺寸收缩时,缺陷散射信号强度快速地下降,这意味着缺陷检测灵敏度急剧降低。而且,从图 4 的结果可知:在传统照明条件下,尺寸大于 16 nm 的桥接缺陷、尺寸大于 26 nm 的断线缺陷以及尺寸大于 40 nm 的颗粒物缺陷是可被检测的;在环形照明条件下,尺寸大于 10 nm 的桥接缺陷、尺寸大于 13 nm 的断线缺陷以及尺寸大于 17 nm 的颗粒物缺陷是可被检测的。这表明,在特定检测配置条件下,晶圆缺陷的可检测性强烈地依赖于缺陷尺寸,相似的现象也曾在 Meshulach 等^[73]的研究工作所报道。理论上而言,晶圆缺陷的散射截面和 d^6/λ^4 近似成正比,因此缺陷的散射信号会随着尺寸的收缩而急剧衰减。同时,背景图案结构的高阶散射信号会随着 CD 的减小而增大^[74],

这将造成晶圆图案的背景信号强度增加,进而造成散粒噪声幅度增加,从而缺陷尺寸的收缩也会造成缺陷散射信号的信噪比降低。至于照明配置条件对缺陷可检测性的影响已被广泛地研究^[65],主导晶圆缺陷检测灵敏度的高阶散射信号在环形照明条件下是更容易被捕获的,更细致地讨论并不在本文所述范畴内。

与此同时,图 4 所展示的结果表明,不同类型缺陷其散射信号强度对其尺寸的依赖性规律是有显著差异的。在相同照明配置条件下,当缺陷类型从桥接缺陷变化为断线缺陷或颗粒物缺陷时,缺陷的可检测性亦显著改变。而且,缺陷检测灵敏度曲线也随着缺陷类型变化而显著地变化。大量的文献资料也报道了缺陷类型对缺陷可检测性的影响^[55, 75-78]。例如, Barnes 等^[75]利用三维光学体检测实验证实了相同尺寸的水平 and 垂

直桥接缺陷具有不同的缺陷可检测性。Silver 等^[76]通过时域有限差分(FDTD)仿真对比了中心颗粒和边缘突出缺陷的可检测性的差异,结果表明边缘突出缺陷的散射信号强度显著大于中心颗粒的散射信号强度。Fujii 等^[55]采用光学仿真方法讨论了层状图案中桥接缺陷和断线缺陷的可检测性的差异,相应的结果表明桥接缺陷比断线缺陷更易被检测。除了上述常见的三类缺陷之外,其他诸如边缘水平桥接、凹陷、突出等缺陷其散射信号强度也会各不相同。本质上,缺陷散射信号强度对缺陷类型的依赖性可采用势散射积分方程进行定性说明^[69],不同类型的晶圆缺陷具有不同的散射势,这些散射势的差异在于空间分布特性,那么在相同入射电磁场加载条件下,不同类型的晶圆缺陷将具有不同的散射场。

此外,晶圆背景图案形态也会影响晶圆缺陷的可检测性。最简单的例子是,水平取向的线-空间图案和垂直取向的线-空间图案对照明光束的偏振态具有不同的响应特性^[58],进而在这两类背景图案中的相同类型缺陷也将具有不同的检测灵敏度与可检测性。同时,在相同像素物理尺寸条件下,同一台晶圆缺陷检测设备在存储 IC 芯片和逻辑 IC 芯片中的缺陷检测灵敏度具有显著差异,这也从侧面反映了晶圆背景图案的周期性特征同样会显著地影响缺陷的可检测性。此外,计算光刻中的亚分辨率辅助增强技术也是反映散射目标中背景图案会调控局域电磁散射行为的直观例子^[79]。

3 晶圆缺陷检测系统

光作为电磁光谱范围内的电磁辐射,可采用四个基本物理量来完整描述,即频率、幅值、相位和偏振^[80]。通常情况下光学缺陷检测是在线性光学系统中实施的,而频率与光-物质之间的相互作用无关^[81],所以光学检测系统可以根据实际使用的其他被测物理量进行

分类。本节也首先会综述这些经典的、广泛应用的且发挥主力作用的检测方法。与此同时,引入具有结构化波前的照明光束(如轨道角动量光束)、太赫兹表面等离子极化激元、近红外双曲布洛赫模,以充分利用光-物质相互作用的空间分布特性,进而提高检测系统对特定类型缺陷的检测灵敏度,这将是本节阐述的内容之一。根据瑞利衍射判据,直接微缩照明光束波长至 X 射线波段,有望将检测系统的成像分辨率提高至 10 nm 和亚 10 nm 尺度,这将为图案化晶圆深亚波长缺陷检测提供极具潜力的解决方案。充分利用扫描电镜中电子束的高空间分辨率,并引入多束电子束成像以增加检测束的通量,从而建立高成像分辨、高检测效率的多电子束缺陷检测方法。以上能够实现晶圆缺陷的高分辨成像的两种方法也被细致阐述了。此外,鉴于热成像效应的缺陷检测方法能够给业界提供“依靠非光学的场量来实现晶圆缺陷检测”这一极具意义的启发,本节也对此检测手段进行了简要介绍。

3.1 基于幅值的光学检测系统

人造探测器,例如电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS),只能探测到光的辐射。因此,光学检测最直接的方法是从原始光强图像中提取缺陷特征信号。工业界领先的设备制造商,包括 KLA-Tencor、Applied Materials、Hitachi Technologies、JEOL 和 ASML,均提供基于振幅或强度的光学检测系统。在他们的系统中,用于缺陷检测的明场照明、暗场照明或两者的组合被广泛使用^[82]。明场照明是最常用的照明配置,通常包括与收集光路大致重合的定向照明光路^[83]。相反,暗场照明是指与收集光路明显分离的定向照明光路^[84],这在对高反射表面成像或产生边缘效应的情形中是特别有效的,如图 5(a)和(b)所示。在图 5(c)中,图案化晶圆缺陷检测系统将测试芯片的空间像与相邻芯片的空间像进行比较^[85],以获得仅有非零随机缺陷特征信号的空间像

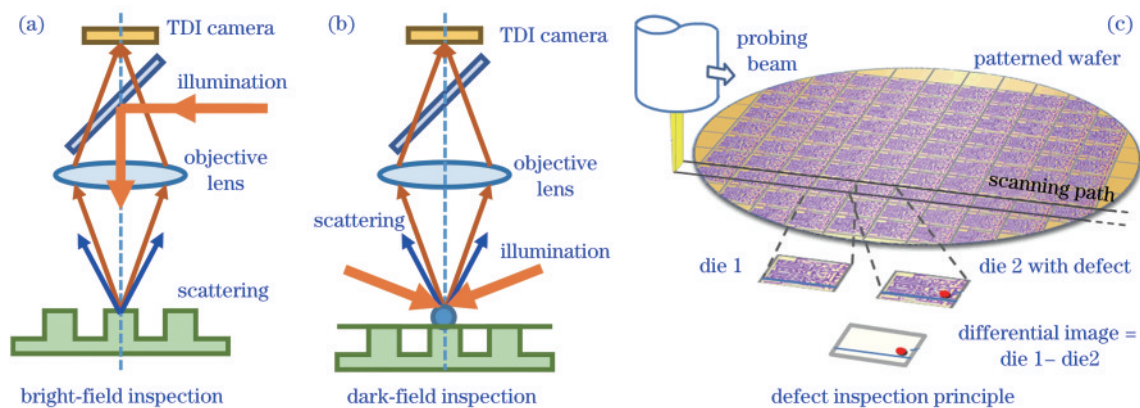


图 5 图案化晶圆缺陷传统光学检测方法。(a)明场照明缺陷检测方法;(b)暗场照明缺陷检测方法;(c)图案化晶圆缺陷在线检测原理图

Fig. 5 Conventional optical inspection methods for defects in the patterned wafer. (a) Bright-field inspection for defects; (b) dark-field inspection for defects; (c) schematic diagram of online defect inspection for the patterned wafer

差分图像^[86]。缺陷的位置允许在晶圆上生成缺陷地图,类似于无图案晶圆所对应的缺陷地图。图案化晶圆检测需要对晶圆样件载物台和检测系统的光学组件进行精确且可重复的运动控制。

为了解决芯片区域空间像之间的差分图像无法检查出的系统缺陷的问题,可以考虑制造一个已知的无缺陷的完美芯片的参考空间像^[87],但是在此过程中排除 IC 芯片生产线上的各种不确定性干扰是极其困难的。另一种方法即称为“Die-to-Database(片-对-库)”^[88-89],将芯片的实验空间像与通过模拟得到的无缺陷芯片的理论空间像进行比较。模拟空间像可采用傅里叶光学理论进行计算^[90-91],该理论能够将芯片的近场分布转换为像平面处的空间像。然而,对芯片的实际光刻过程和实际成像过程进行模拟绝非易事。首先,由于芯片的尺寸远大于检测系统中照明光源的波长,因此计算逻辑 IC 芯片的近场分布是非常耗时和消耗计算资源的^[92]。尽管周期性阵列存储 IC 芯片的近场计算所涉及的开边界问题能够采用周期性边界条件进行近似处理^[93],但此计算过程中需要使用足够大尺寸的计算单元,从而消除非物理边界假设条件所造成的可能边界效应^[94]。同时,在先进技术节点中,所涉及线结构的线宽粗糙度、线边粗糙度可能与所关心缺陷的尺寸相当^[95],那么这两者必须在物理建模工作中加以考虑。然而,线宽粗糙度和线边粗糙度所对应的真实形貌在实际线结构中是随机的,那么它们对缺陷检测过程的影响将难以被准确地预测。随着照明光源的波长不断微缩,线宽粗糙度和线边粗糙度的效应将变得愈发严重。有限元法^[96]、FDTD 法^[97]和矩量法等三类成熟的电磁学求解算法已经广泛应用于图案化晶圆散射近场的高精度数值计算^[98-99],然而将此三类算法应用于短波长条件下晶圆缺陷的散射近场计算时,其所涉及纳米级特征(尤其是粗糙度)的精细离散化将需要海量的计算资源。

和“Die-to-Die(片-对-片)”以及“Die-to-Database”的方法相比,“self-comparison(自比较)”的方法或许能够在较小计算时间成本的限制下进行系统缺陷的可靠检测^[100]。顾名思义,自比较是一种通过将芯片的光学图像与其自身进行比较来检查缺陷的方法。如果芯片中的图案结构在水平面内是周期性的(例如,存储器 IC 芯片),那么自比较方法在理论上很有效^[101],因为将芯片水平移动 $n \cdot P$ (其中 n 是整数, P 表示相同图案的间距)不会改变光学图像,即 $I_p(x) = I_p(x + n \cdot P)$ ^[102],其中 x 和 I_p 分别表示芯片的水平位置和相应图案的光学图像。然而,缺陷的非周期特性表明其光学图像不具有位移不变性,也就是 $I_d(x) \neq I_d(x + n \cdot P)$,其中 I_d 表示缺陷的光学图像。那么,如果芯片的检测区域内存在缺陷,将偏移 $n \cdot P$ 后的光学图像减去原始光学图像可获得缺陷的光强信号^[103],即

$$\Delta I = I_p(x) + I_d(x) - I_p(x + n \cdot P) - I_d(x + n \cdot P) = I_d(x) - I_d(x + n \cdot P) \neq 0, \quad (4)$$

式中: ΔI 是差分图像。此方法在数学上是极其简单的,并且其避免了由机械位移所引起的长距离不稳定性。值得强调的是,根据位移不变性要求,也就是 $I_p(x) = I_p(x + n \cdot P)$,上述自比较方法仅适用于存储 IC 芯片的缺陷检测^[103],而不适用于逻辑 IC 芯片的缺陷检测。迄今为止,Die-to-Die 和 Die-to-Database 方法依旧是逻辑 IC 芯片中缺陷检测的主力^[104]。

传统上,明场照明配置下的图案化晶圆缺陷检测是在成像系统的最佳焦平面上实施的^[105],这意味着缺陷的最佳分辨率和最佳对比度均位于最佳焦平面处。然而,实际上,图案或缺陷均会与晶圆基底之间存在强电磁耦合,进而可能会造成缺陷特征信号的峰值在光轴方向发生偏移^[106],这能够通过静电近似理论进行解释^[107]。因此,将晶圆图案的空间像沿垂直方向而不是水平方向进行 Die-to-Die 处理极有可能产生具有更高 SNR 的缺陷特征信号。焦深扫描光学显微镜(TSOM)允许传统光学显微镜通过将不同聚焦位置所捕获的二维(2D)光学图像进行组合以收集低至纳米级的目标物尺寸信息^[108-109],其横向和纵向测量灵敏度可低至 1 nm ^[110]。鉴于半导体制造中所使用的传统明场检测技术其测量性能的灰色区域位于 11 nm 节点附近,此 TSOM 技术依靠 z 轴方向层析所产生的丰富信息能够极大地拓展明场显微镜的检测能力^[111]。如图 6 所示,通过将焦深图像堆叠为焦点位置的函数,可产生包含光学信息的三维空间^[36,75,112]。在此 3D 空间中,通过任何给定方向的感兴趣位置提取横截面 2D TSOM 图像。然后,可以通过从基准 TSOM 图像中减去缺陷扰动的 TSOM 图像来获得缺陷信号^[113]。通过将此聚焦扫描所捕获的 3D 电磁散射场与照明配置优化、先进后处理算法相结合,极有可能实现亚 10 nm 尺度缺陷的检测^[114]。但 TSOM 方法所带来的缺陷检测灵敏度改善是以牺牲检测效率为代价的,尽管变形镜^[115]、液体透镜^[116]和空间光调制器能够实现无运动的垂直扫描^[117],但仍然会比传统明场显微镜更耗时。

3.2 基于相位的光学检测系统

从瑞利散射的角度来看,任何关键尺寸为 d 的深亚波长纳米结构对波长为 λ 的非偏振光的散射振幅与 d^3/λ^2 成正比^[118-119]。同时,纳米结构中表面高度为 h 的脊结构所引起的相位变化 φ 可以近似表示为 $\varphi = 4\pi h/\lambda$ ^[120],这表明相位对垂直方向的亚波长尺寸变化的灵敏度显著高于振幅对该尺寸变化的灵敏度。那么,针对晶圆缺陷,背景与缺陷之间的折射率差异 Δn 可能会产生 $\varphi = 4\pi h \Delta n/\lambda$ 的相位变化^[121]。可以推测,此相位信息对上表面和下表面的缺陷都很敏感。

为了重建光相位,干涉测量技术,如移相干涉法和数字全息显微镜被广泛使用^[122-126]。然而,由于传统双

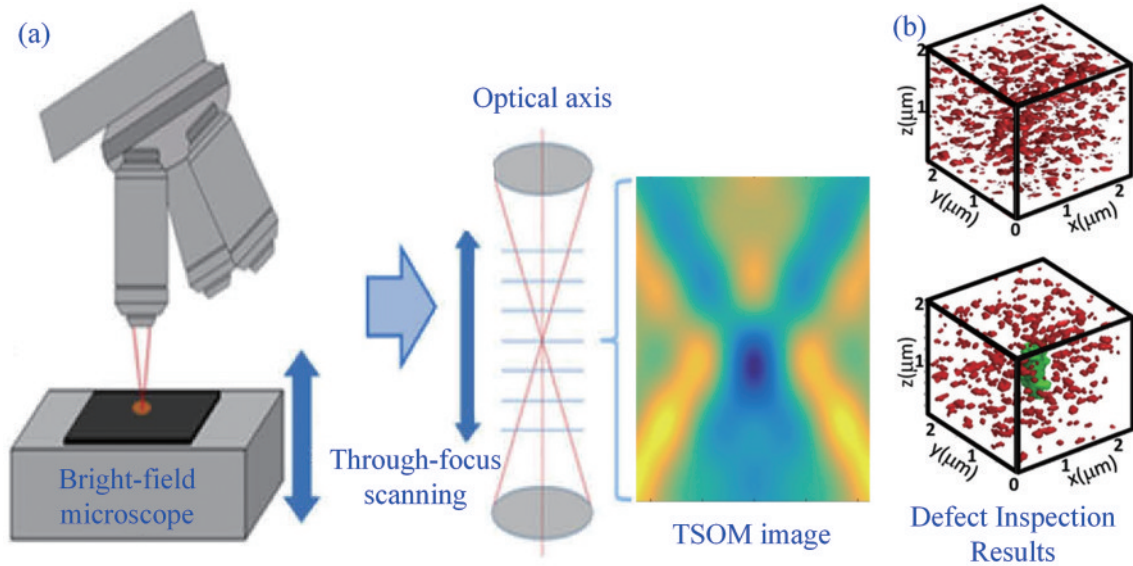


图 6 焦深扫描光学显微缺陷检测方法。(a)焦深扫描光学显微成像原理^[112];(b)用于缺陷检测的体分析方法^[75]
Fig. 6 TSOM for defect inspection. (a) Principle of TSOM^[112]; (b) volumetric analysis for defect detection^[75]

光路干涉仪的振动噪声可能会干扰微弱的缺陷信号^[127],因此并不是所有的干涉测量技术都适用于缺陷检测。共光路干涉测量法是一种定量相位成像技术^[128],通常广泛应用于生物医学检测领域^[129],由于其对振动噪声的强鲁棒性和毫秒级的高测量速度,在图案化晶圆缺陷检测方面具有巨大的应用潜力。为了实现缺陷检测,Zhou 等^[130]在共光路(epi)模式下建立了一个专门的衍射相位显微镜(DPM)。DPM 是利用衍射光栅与 $4f$ 透镜系统创建的共光路干涉仪^[131]。在此几何光路配置条件下,干涉仪是非常稳定的,并且能够实现高灵敏的时间分辨测量。由于衍射光栅的周期性,在不同的角度会产生多个图像。第 0 阶和第 1 阶被选择用于在成像平面上创建最终的干涉图^[132]。其他阶数要么不通过第一个透镜,要么在傅里叶平面被滤

除掉,如图 7(a)^[132]所示。此紧凑配置能够从本质上消除大多数系统噪声,并且能够通过单发实验采集图像,这意味着采集速度只受限于相机的积分时间。将此 epi-DPM 与诸如二阶差分、图像拼接和卷积等后处理策略相结合^[133-135],可实现平行桥接、垂直桥接、孤立颗粒物和垂直线突出等各类缺陷的可靠检测,且缺陷的最小尺寸可达 20 nm。基于光栅色散的共光路干涉仪能够自然地拓展至白光照明配置^[136],从而可进一步增加对更多类型缺陷的适应性。然而,由于色散的原因,宽带干涉测量系统中的 +1 阶衍射光会分散至傅里叶滤波平面中的所有颜色光分量中,使得其难以实现低通滤波处理。所以,采用 +1 阶衍射光成像的宽带干涉测量系统往往会受到像散的影响。

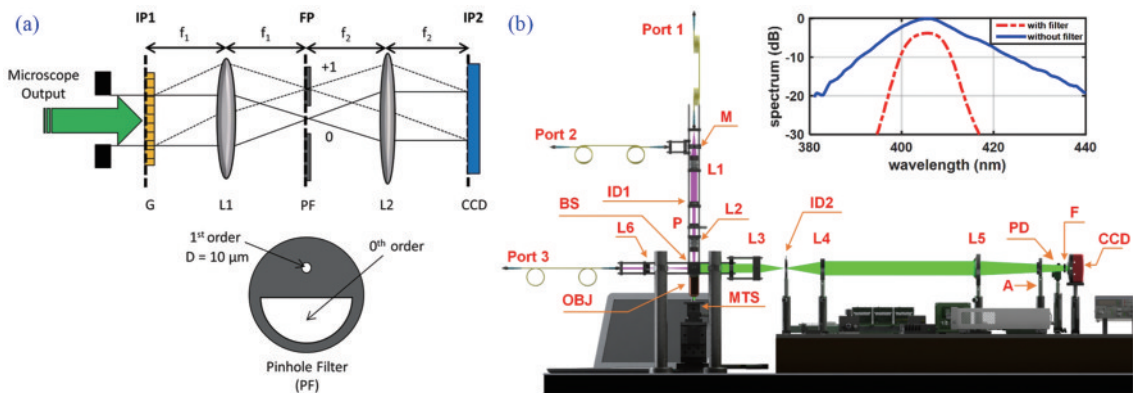


图 7 基于相位的光学缺陷检测系统。(a)共光路衍射相位显微镜^[132];(b)光学伪电动力学显微镜^[137]
Fig. 7 Phase-based optical inspection system for defects. (a) Epi-DPM^[132]; (b) optical pseudo electrodynamic microscopy^[137]

光学伪电动力学显微镜(OPEM)^[137-138],如图 7(b)所示,是建立在通过求解二维泊松方程的一种由光学照明所诱导的纳米结构散射力测量方法^[139],可被视为

一类特殊类型的相位成像技术^[140],这是因为由缓变电场(如平面波)辐照的纳米级目标物其散射力与相位的空间梯度成正比^[141]。由于目标物的散射截面与所测

强度难以进行解耦^[142],因此 OPEM 所涉及的散射力是一个准力而非真正的力,不过图案化晶圆缺陷的光学检测只需要以定性的方式对缺陷进行识别与定位。在没有复杂仪器和降噪后处理算法的情况下,可成功检测 2.3 nm 尺寸的高度差与各种宽度在 10 nm 以下的半导体缺陷^[137],这表明 OPEM 对系统噪声是稳健的,对纳米尺度的扰动是敏感的。尽管 OPEM 已经显示出检测纳米级缺陷的能力,但迄今为止,此技术还不能定量地测定纳米结构的高度,因而还需更多理论探索才能确保基于光学散射力测量的可行性。

3.3 基于偏振的光学检测系统

传统的光学晶圆缺陷扫描是业界的标准方法,因为它具有效率高和高灵敏度等优点^[143]。然而,标准的光学缺陷检测工具所识别的缺陷还需单独的扫描电子显微镜(SEM)进行复检,以确定这些缺陷是否是图案化缺陷^[144]。光学散射测量法^[145-146],也被称为光学关键尺寸(OCD)计量法,通过利用光在晶圆上的衍射偏振特性来测量周期性纳米结构的轮廓参数^[147-150],即比较实测的偏振态变化与理论计算的偏振态变化。如果存在图案缺陷,它将打破几何周期性,并在光学响应中引入一个额外的特征信号^[98],从而降低光谱拟合的质量。然

而,散射测量法是一种非成像技术,并且其照明光斑的最小尺寸始终大于 5 μm ,因此该方法难以实现缺陷的精确定位,从而其在先进节点中的缺陷检测场景中并没有被广泛使用。成像椭偏仪^[151-153],是一种将偏振对称显微镜成像技术与光谱椭偏测量方法相结合的仪器,它具有定位图案化晶圆缺陷的潜力。目前,最先进的成像椭偏测量系统具有小于 1 μm 的空间分辨率^[154-155],而且其作为一种成像技术避免了如散射测量法所涉及的点扫描所需的时间成本。然而,由于市面上的成像椭偏仪是为纳米薄膜表征而设计的,其光路设计、相机噪声和系统校准可能不是图案化晶圆缺陷检测的最优配置。因此,定制的偏振光学系统比商业化的成像椭偏仪在学术界是更为常见的。Hong 等^[156]提出了干涉测量式交叉偏振显微成像方法(ICPM),是用于颗粒物缺陷成像检测的一种出色的信噪比增强方法。他们证明,通过将传统交叉偏振显微镜与光学外差干涉测量术相结合,能够有效地放大来自尺寸小至 5 nm 的颗粒物所散射的微弱信号,并且能够极大地抑制系统的散粒噪声。同时,该方法表征了散射光场信息而非强度信息,从而显著地增加了信噪比,并且能够恢复完整的振幅与相位响应。具体原理和相应实验结果如图 8 所示。

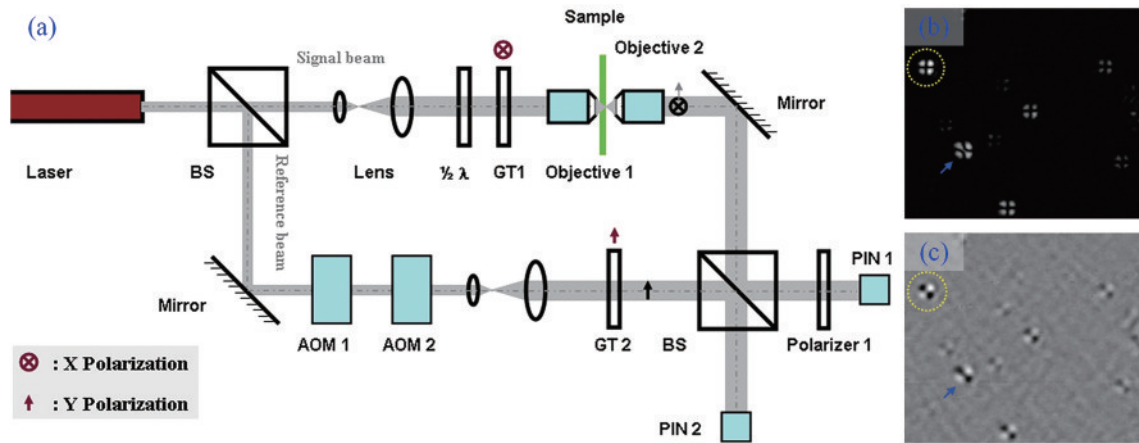


图 8 干涉测量式交叉偏振显微镜的缺陷检测。(a)干涉测量式交叉偏振显微镜原理示意图^[156];(b) Au 纳米颗粒物的光学振幅成像检测结果^[156];(c) Au 纳米颗粒物的光学相位差成像检测结果^[156]

Fig. 8 Interferometric cross-polarization microscopy for defect inspection. (a) Schematic diagram of an interferometric cross-polarization microscopy^[156]; (b) optical amplitude of the scattered light from the Au nanoparticle^[156]; (c) optical phase difference with respect to the light in the reference branch^[156]

3.4 基于轨道角动量的光学检测系统

轨道角动量(OAM)^[157-158],与宏观上以圆偏振光形式呈现的自旋角动量不同^[159],表现为光子的轨道旋转^[160]。OAM 描述了拥有螺旋形波前的结构化波,其扭曲的数量可以识别每个 OAM 状态^[161]。因此,携带 OAM 的波具有独特的相位结构,其在从经典范畴至量子范畴的应用场景中均具有广阔的前景^[162-163]。Wang 等^[164]提出了一种缺陷检测策略,在相干傅里叶散射测量法(CFS)中使用 OAM 光束作为探头。如图 9 所示,传统检测方法往往采用具有高斯空间剖面

的光束辐照含缺陷的晶圆图案,随后将所捕获的背反射信号与无缺陷晶圆图案的参考信号进行比较,以获取缺陷的特征信号。与之相比,只要图案结构具有反射对称性,那么基于 OAM 的相干傅里叶散射测量将是独一无二的,因为其不依赖于对预先构建的数据库的参考。当缺陷是被具有整数 OAM 电荷 $q=+1$ 或 $q=-1$ 的单一 OAM 光束 $P_q(x, y)$ 辐照时,由 OAM 光束产生的散射图案展现出明显的非对称性,这可应用于缺陷检测。然而,OAM 光束在无参照物的缺陷检查方面比高斯照明光束更具有优势,但此检测方法建

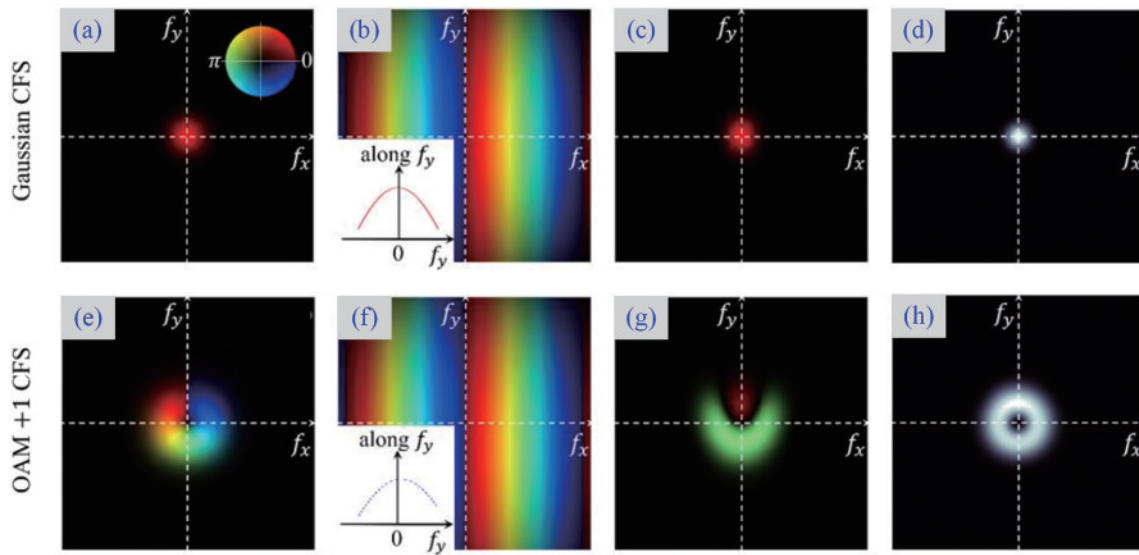


图9 高斯光束与轨道角动量光束辐照于具有振幅缺陷的光板基底时所产生的远场衍射图案特征^[164]。(a)(b)在基于高斯光束的相干傅里叶散射测量方法的远场中的复数场,其是由无缺陷基底与有缺陷基底所产生的;(c)干涉光强图案;(d)远场衍射图案;(e)~(h)基于 ± 1 阶轨道角动量光束的相干傅里叶散射测量的相应结果

Fig. 9 Characteristics of far-field diffraction patterns from Gaussian and OAM beams illuminating on blank substrate with amplitude-only defects^[164]. (a)(b) Complex fields from the defect-free substrate and from the defect in the far-field from Gaussian CFS; (c) interference intensity pattern; (d) far-field diffraction pattern; (e)–(h) corresponding results of coherent Fourier scattering measurement based on ± 1 order orbital angular momentum beam

立在几何对称性的假设之上,这或许会将检测方法限定于存储IC芯片的缺陷检测中。

此外,OAM照明不能解除内在的物理限制——瑞利散射,若缺陷的尺寸比照明波长小得多,由缺陷引起的波前扰动则非常弱。而且噪声的存在,如表面粗糙度和系统误差(包括光学像差和光学元件的缺陷),可能易淹没缺陷的信号。由于OAM光束的波前具有空间相位分布^[165],OAM缺陷检测系统中缺陷的敏感性应该是与空间坐标相关的。实际上,具有任意拓扑电荷的OAM光束可以被分解成许多具有不同波矢的平面波^[166],这表明基于OAM的检测与传统明场缺陷检测系统中使用的多样化照明配置的情况类似,从角谱理论的角度来看,它本质上是一种照明工程^[167]。总的来说,基于OAM的缺陷检测是一种很有前景的技术,但从技术和市场的角度来看,还需要更深入的研究。

3.5 基于太赫兹波的缺陷检测系统

局域表面等离子体共振(LSPRs)是金属纳米粒子中受光激发所产生的集体电子电荷振荡^[168-169]。众所周知,金属颗粒(如Au和Ag颗粒)一旦被可见光或近红外区域(NIR)的电磁波照射,它们在共振波长处就会展示近场振幅增强行为^[170-171]。此近场在纳米颗粒处是高度局部化的,并且会在从纳米颗粒/电介质界面到电介质基质的传播过程中迅速衰减,尽管上述共振也增强了颗粒物的散射远场^[172]。光强增强是LSPR的极其重要的特征^[173],其表明金属颗粒通常比电介质对应物在谐振波长处更容易被光学检测。相似地,如

果被检测的硅晶圆样件能够被其相应的共振波长激发,那么缺陷的散射特征信号也或许会增强几个数量级,其机制类似于LSPR状态下的金属纳米颗粒^[174]。事实上,大多数半导体在太赫兹(THz)区间中具有等离子体频率^[175],因而太赫兹表面等离极化激元(SPPs)有望成为半导体表面缺陷无损检测的有效工具^[176]。由于SPPs的能量限制是与SPPs的频率和半导体的等离子体频率之间的重叠程度高度相关的^[177-178],则使用频率略低于半导体等离子体频率的太赫兹波也能够实现高灵敏度缺陷检测。Yang等^[179]开发了一种太赫兹频段缺陷检测系统,其原理如图10(a)所示。在刀片和半导体表面之间的间隙处所发射的太赫兹波将在间隙处被散射,其散射波会包含传播模和倏逝模的连续统一体^[180-181],这将使得SPPs的激发成为可能。SPPs主要沿垂直于刀片的方向并沿着半导体表面进行传播,放置在距第一个刀片特定距离处的第二个刀片用于将SPPs耦合到自由传播的辐射中,随后此辐射将被探测到。如果半导体表面存在缺陷(例如,位于表面上方的颗粒或表面下方的气泡),则SPPs在通过时会被缺陷散射或反射。那么,所输出的太赫兹波的强度将根据缺陷的存在而展现不同的特征。通常,这种基于SPPs的原型系统无法产生缺陷区域的“图像”,而仅会产生一个与缺陷特征对应的一维信号,并且此缺陷特征必须通过与无缺陷晶圆的参考信号进行比较才能识别。因此,该系统可能更适合开展无图案晶圆的缺陷检测。为了实现图案化晶圆的缺陷检测,基于LSPR的太赫兹成像系统是更合适的,其成像原理如图10(b)所

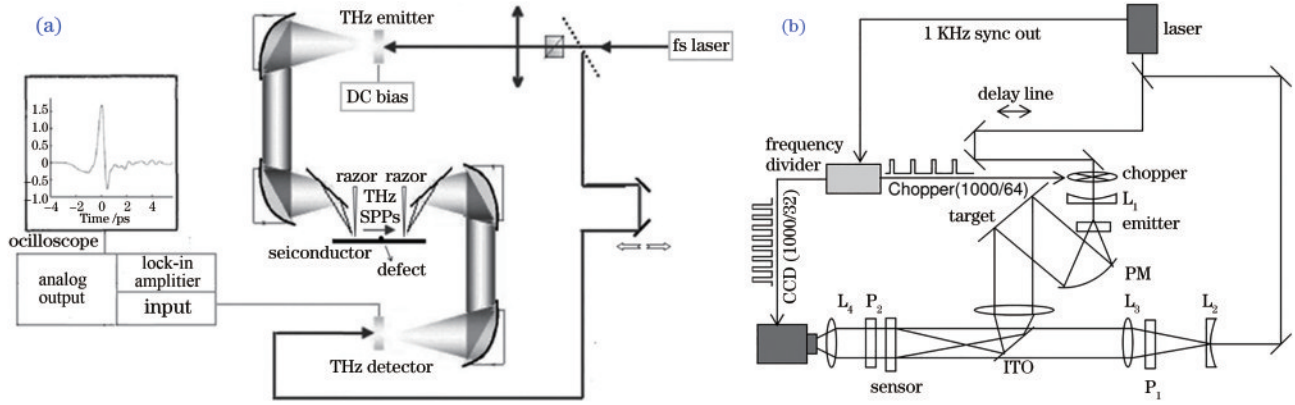


图 10 晶圆缺陷的太赫兹检测方法。(a)基于太赫兹波的缺陷检测系统;(b)太赫兹实时成像系统

Fig. 10 THz detection method for defects in the wafer. (a) Schematic of THz wave-based defect inspection system; (b) schematic of THz real-time imaging system

示^[182]。在此系统中,定制的太赫兹波将辐照于图案化晶圆表面,从而激发出特定类型缺陷的 LSPR。归因于 LSPR 的强近场约束和强吸收,THz 图像所实现的缺陷检测灵敏度和对比度或许会极大地增强。然而,尽管表面等离激元共振 (SPR) 或局域表面等离激元共振可以显著地增强缺陷的散射截面或近场约束,但图案化晶圆缺陷的尺寸处于个位数节点级别,其远小于 THz 波长,这将导致亚 10 nm 图案化缺陷的散射截面 (SCS) 是非常小的^[183]。相应地,由于瑞利散射,在 LSPR 波长处散射场的增强可能会被极小的 SCS 所抵消。因此,在基于太赫兹波段的晶圆缺陷检测方法走向实际应用之前,还需更详尽的研究。

3.6 基于双曲布洛赫模的缺陷检测系统

上述晶圆缺陷光学检测系统(即第 3.1~3.5 节所讨论的系统)是高度依赖于光学显微成像技术的创新。当样件基板在感兴趣的区域 (RoI) 内扫描时,基于光学成像的缺陷检测技术要求获取晶圆样件的位置配准图像^[178,184]。采用快速图像对比算法能够实现缺陷特征的识别,该算法将所采集的样本图像与无缺陷的参

考图像进行细致比较^[184]。通常,传统缺陷检测系统 [尤其是 IC 芯片制造生产线所使用的设备,如图 11(a) 所示] 能够检测所有类型的缺陷,但它们会对某些缺陷如深埋缺陷丧失灵敏度。Yoon 等^[185] 提出了一种充分利用样品侧信息而非仪器侧信息的创新方法。在其方法中,待测样品是 3D NAND (Not AND) 闪存芯片,具有微米级高度、百纳米级周期、十纳米级最小关键尺寸的层状结构,如图 11(b)^[185] 所示。类似于一维双曲超材料或布拉格光栅或一维光子晶体^[186-188],由于异号约束条件 $\text{Re}(\epsilon_{\parallel}) \cdot \text{Re}(\epsilon_{\perp}) < 0$ ^[189],此分层结构在 $\lambda > 1 \mu\text{m}$ 的红外波段内展现了周期性耦合的表面等离激元模 (即垂直布洛赫模),这为羽流喷溅、桥接、残留物、空隙等深埋缺陷提供了鲁棒的信号放大机制。而且,由于半导体材料在红外波段内的吸收率比在可见光或深紫外波段内的吸收率要弱得多^[190],那么该方法可识别位于比趋肤深度大 10 倍位置处的亚表面缺陷,如图 11(c) 所示。尽管此方法具有显著的优点,但要求周期性耦合的表面等离激元模,而这些电磁模仅能在垂直周期性结构中被利用,因此该方法仅限于层状周

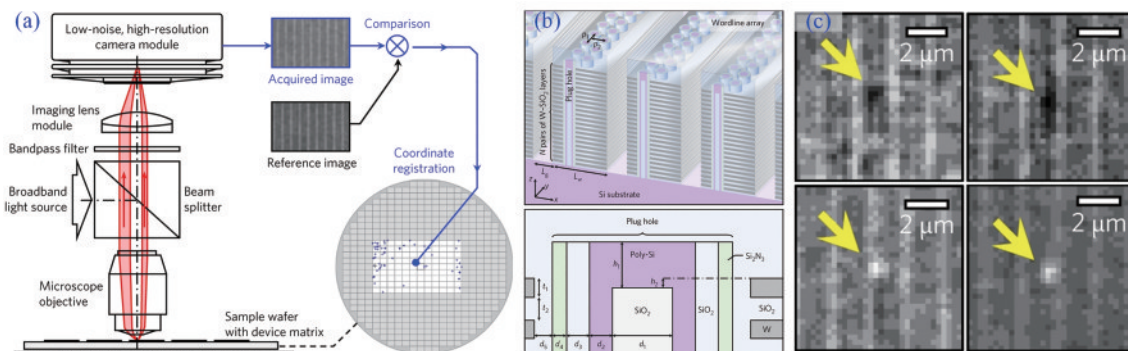


图 11 针对三维 NAND 闪存样件的缺陷检测系统^[185]。(a)基于标准光学显微镜的标准缺陷检测系统示意图;(b)典型三维 NAND 闪存结构示意图;(c)数个近红外识别缺陷点的近红外显微图像

Fig. 11 Defect inspection system for 3D NAND flash memory^[185]. (a) Schematic of a standard optical-microscopy-based defect inspection system; (b) schematic of a typical 3D NAND flash memory structure; (c) near-infrared micrographs for several near-infrared-identified defect spots

周期性结构样件的缺陷检测。

3.7 基于 X 射线相干叠层成像的缺陷检测系统

由于光学显微镜衍射极限,上述在深紫外和可见光波段内所实现的缺陷检测难以对深亚波长纳米结构进行清晰成像,也更无法对各种缺陷进行分类。为了提高分辨率,最直接的方法是将照明光波长缩小到个位数纳米量级^[39,191]。然而,由于电离效应和强材料吸收效应^[39],无法像在基于显微物镜的传统成像系统中那样实现如此短波长的光学成像。但是,X 射线叠层衍射成像凭借纳米级分辨率为整个晶圆的直接 3D 成像开辟了极具前景的道路^[192-194]。Holler 等^[195]已经证明在硬 X 射线波段内所实现的叠层衍射成像能够产生已知和未知设计的 IC 芯片的 3D 图像,其所有方向的横向分辨率均低至 14.6 nm。在该研究结果中,英特尔处理器有源层下方的整个多层结构区域,包括源极和漏极触点、栅极触点和带鳍的栅极,均能够被无损地重构。同时,尺寸小至 20 nm 的纳米结构也能够被清晰地分辨。迄今为止,硬 X 射线的叠层衍射成像是唯

一能够对整个晶圆表面和亚表面 20 nm 尺寸缺陷进行直接成像的光学方法^[196],但由于同步辐射 X 射线光源、超大数据量、低采集速度等刚性约束,X 射线叠层衍射成像目前难以直接应用于 IC 芯片生产线的缺陷在线检测。可喜的是,最近 Tanksalvala 等^[197]提出了基于桌面型高次谐波光源的相位敏感型成像反射计,其基本原理与 X 射线叠层衍射成像方法相同,区别仅在于桌面型高次谐波光源、多掠入射角下的反射成像光路配置、介于 13~30 nm 范围的探测光波长、更先进的全变分正则化后处理算法,该方法能够无损地重构器件的表面拓扑形貌、层厚度、界面质量以及掺杂浓度分布等,如图 12^[197]所示。此方法不仅能凭借高横向分辨率实现表面缺陷的检测,也能依靠高纵向分辨率实现亚表面缺陷的检测。可以相信,不管是 X 射线或是 EUV 叠层衍射成像装置在未来均有可能突破 10 nm 横向分辨率和埃量级轴向分辨率,通过使用更短或多波长照明、更高的数值孔径进行成像,进而以优于 10 nm 的分辨率对 IC 芯片进行快速和无损成像。

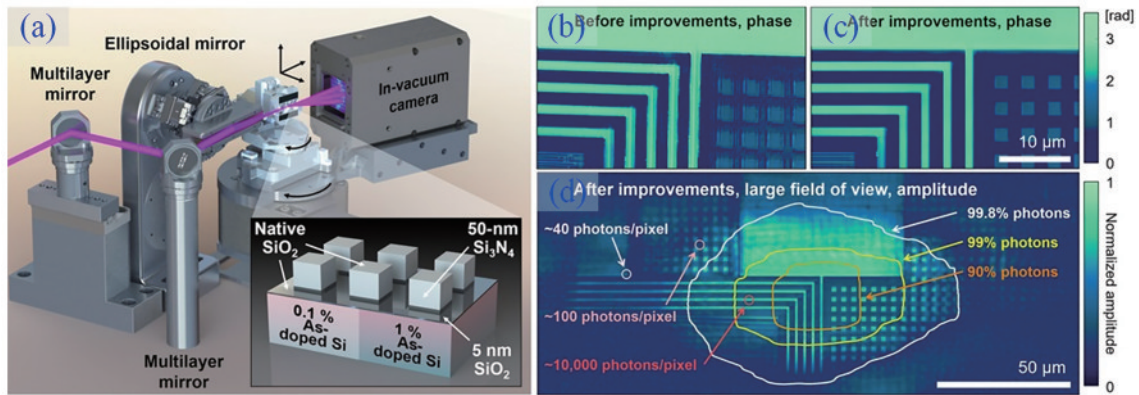


图 12 纳米结构样件的缺陷 EUV 叠层衍射检测方法^[197]。(a)具有大面积、空间和深度分辨力的振幅与相位敏感成像反射计示意图;(b)原始 EUV 叠层衍射成像相位重构结果;(c)在精确实施三维倾斜相位校正和全变分正则化后的放大 EUV 叠层衍射成像相位重构结果;(d)完整宽视场的振幅重构

Fig. 12 EUV ptychography imaging-based defect inspection^[197]. (a) Schematic of the amplitude- and phase-sensitive imaging reflectometer with large-area, spatially and depth-resolved capability; (b) original phase reconstruction from EUV ptychography imaging; (c) zoom-in of EUV ptychographic phase reconstructions of the sample after precision implementation of 3D tilted-phase correction and total variation regularization; (d) entire wide field-of-view amplitude reconstruction

截至目前,基于振幅的检测技术,尤其是明场显微镜,具有高速(例如,KLA-Tencor 39XX 系列的检测速度最高可达每小时 2 片 12 英寸晶圆)、经济效率和对不同类型缺陷的普适性等固有优势,仍然是工厂的主力军。不过随着 SNR 和缺陷检测灵敏度在先进技术节点变得越发重要,理论上不遵循瑞利散射定律的相位型、偏振型和 OAM 型检测策略可能会在更高的信噪比和灵敏度领域发挥重要作用,但其对更多类型缺陷的普适性还需进行更为深入的研究。由于基于相位、偏振和 OAM 的检测系统均能够实现单发测量,因此其检测效率能够比肩 IC 芯片生产线中传统光学缺陷检测工具(即明场检测设备)。基于太赫兹波的检测系统其检测效率理论上能够与传统光学成像解决方案一

样高,但尚未在图案化晶圆缺陷检测场景中进行验证。鉴于大多数半导体材料的等离子体频率位于太赫兹波段,能够通过特定光照条件下激发缺陷的 LSPR 来提高缺陷的 SNR,这与纳米光子学中金属(例如,Au 和 Ag 的 LSPR 位于可见光至近红外波段内)所表现的行为是相似的,但图 10(a)所示的基于太赫兹的缺陷检测系统的性能却类似于 AFM 的性能,其检测是在栅格扫描模式下实现的,这表明该设备的检测速度将比传统光学缺陷检测工具至少慢一个数量级。尽管尚未被实验所验证,但引入成像方法或可提高太赫兹波段图案化晶圆缺陷的检测效率。基于双曲布洛赫模的检测系统与上述任何系统都不相同,其并非图案化晶圆缺陷检测领域的通用解决方案,而是只能应用于具

有类似于布拉格光栅结构的晶圆样件的缺陷检测,且所检测晶圆样件的周期应是检测波长大小相当的。因此,尽管该方法的检测效率与传统光学缺陷检测工具大致相当,但其仅适合于存储 IC 芯片的缺陷检测。据我们所知,X 射线和 EUV 叠成衍射成像是唯一能够对整片晶圆表面和亚表面的亚 20 nm 缺陷进行直接成像的光学方法。然而,该方法的工作效率极低,难以满足当前 IC 芯片制造产线的晶圆缺陷在线检测的效率要求(通过对已有数据进行粗略估计,该方法扫描整片 12 英寸硅晶圆至少需要 236 天),但未来一旦克服了包括同步辐射 X 射线光源、海量数据处理和低扫描速度等缺点,我们相信此技术能够为图案化晶圆缺陷检测领域提供变革性的解决方案。

3.8 多电子束扫描缺陷检测系统

在传统的 SEM 中,聚焦电子束在样品表面扫描所产生的各种信号能够提供样品的形貌、化学成分、晶体结构等信息,使其逐渐成为材料与生命科学领域的重要工具。尽管 SEM 具有良好的成像分辨率,但其检测效率难以显著提高,一方面是因为既要维持高 SNR 又要改善检测效率的策略如增加束流会增强电子间的库伦相互作用,这反过来会降低成像分辨率^[198],另一方面是因为二次电子探测器具有不可忽略的衰减时间^[199]。因此,在维持高成像分辨率和对比度的前提下,传统 SEM 的最大成像速度始终受库伦相互作用与探测器带宽的限制^[200]。例如,以 10 nm 的像素大小及 20 MHz 的采集速率扫描 300 mm 直径的整片晶圆,其时间成本将达到一年以上^[201],那么,传统的单束 SEM 难以满足晶圆样件的大视场、3D 高分辨率成像。目前,为了能够实现亚 10 nm 晶圆缺陷的可靠和高通量检测(如高通量指标大于 1000 cm²/h),半导体行业正

在考虑将大规模并行电子束扫描阵列应用于图形化晶圆的缺陷检测^[202],这将成百倍地提高传统电子显微镜的成像效率^[203]。为此,Thiel 等^[204]提出了多电子束电子光学系统的性能要求并建立了相关准则,采用一系列实验评估了多电子束用于亚 20 nm 晶圆缺陷检测的可行性。随后,Bunday 等^[205]使用 JMONSEL 模拟了不同电子束能量、探测斑尺寸、像素尺寸及缺陷材料与类型条件下的多电子束成像结果,并建立了与检测概率相关的信噪比理论框架,从而可指导大规模并行电子束缺陷检测(MPEBI)工具的设计。目前,ZEISS 已经开发出了具有 91 个子束的 MultiSEM 505^[206],Neumann 等^[207]利用 MultiSEM 对 imec-N10 逻辑节点的 IC 芯片进行了成像观测和定量分析,证实了该方法能够实现低至 CD 为 0.64 nm 的 OCD 测量及晶圆缺陷检测能力。随后该团队又利用该设备对 imec-N5 逻辑节点的晶圆进行了观测^[208],并在 200 ns 驻留时间下取得了最优测试图像,同时依靠机器学习(ML)技术实现了晶圆缺陷的检测与分类。以上结果均证明了 MultiSEM 对先进节点下晶圆缺陷的高通量电子束检测能力。ASML 的子公司 HMI 也正在研发面向 7 nm 及以下节点的多电子束检测系统(MBI)^[209-210],如图 13 所示,其电子束数量已从 9 束增加至 25 束^[211]。

迄今为止,有关多电子束扫描电子显微镜(MBSEM)的研究工作鲜有报道,但随着多电子束单元、二次电子束阵列成像、离轴像差优化等电子光学成像技术不断突破,以及高速数据采集与处理方法的改善,必将涌现出更多 MPEBI 设备,进而打破单束 SEM 仅能在晶圆部分微小区域抽样检测的现状^[201],最终为图案化晶圆的高通量缺陷检测与质量控制提供更有力的支撑。



图 13 多电子束扫描缺陷检测系统。(a)HMI 集成的 MBI 系统;(b)上方为用于晶圆对齐的大视场 MBI 图像,下方为带有断线、桥接缺陷的 46 nm 间距周期线图像

Fig. 13 Multiple electron beam scanning detection system for defect inspection. (a) Schematic of the HMI-integrated MBI system; (b) upper part is the large field-of-view MBI images for wafer alignment, and the lower part is the MBI image of a periodic line/space pattern with a pitch of 46 nm, in which line-bridging and line-broken defects are contained in the pattern

3.9 热成像缺陷检测系统

面向晶圆缺陷检测需求,当前主流方法依然是基于远场光学的,这是从检测效率、非破坏性、缺陷灵敏度、对比度等诸多指标综合权衡后的结果。多电子束作为一种从根本上实现“所见即所得”的成像方法被业界寄予了厚望,但其检测效率目前还远远达不到光学检测技术的水平,并且其所需的高真空环境使得将该设备集成至 IC 芯片制造生产线上会成为一个极具挑战的难题。除了上述光学和电子检测方法之外,学术界也探索了基于其他物理量的缺陷检测方法,其中最具代表性的是基于热效应的缺陷检测方法^[212]。类似于传统光学检测方法的原理(缺陷对光场的扰动),基于热效应的缺陷检测本质上是利用缺陷对热场的扰动来实现缺陷的识别。日本东北大学设计了一种基于热效应的缺陷检测系统,该检测系统由晶圆旋转扫描装置与放置在压电陶瓷上的热传感探头组成,如图 14(a)^[212]所示。其中,所使用热传感探头其核心部件是一个热探测单元,该热探测单元通过两侧的电极提供偏置电压,如图 14(b)所示。依靠压电陶瓷,该探测单元被悬吊

在距离待测样品表面数十纳米的高度处,此悬吊高度依赖于待测样件的具体形貌尺寸^[213-214]。当缺陷位于热探测单元正下方时,由局部电阻抗的改变所引起的微弱热能将被探测器感知,进而缺陷的位置能够被确定。显然,该检测方法的检测效率依赖于热探测单元的热响应速度、有效探测面积、晶圆转速、晶圆-探测单元间距等参数。其检测效率可采用类似于多电子成像的配置进行改善,即采用线阵列分布的周期热探测单元,而非仅仅一个探测单元。需要指出的是,该热效应探测方法的缺陷检测灵敏度是否能够满足 10 nm 及以下节点的检测要求还有待进一步研究。可预见的是,针对图案化晶圆中的系统缺陷,热探测单元能够以固定高度对晶圆表面进行扫描检测。然而,针对具有不定型的随机缺陷,则需要引入类似于原子力显微镜的反馈控制机制以避免探头与随机缺陷之间的碰撞,这将在一定程度上限制检测效率。到目前为止,基于热成像原理的缺陷检测方法尚未在关键指标上达到晶圆厂中先进光学缺陷检测系统的水平,但毫无疑问该方法能够为晶圆缺陷检测提供新的思路。

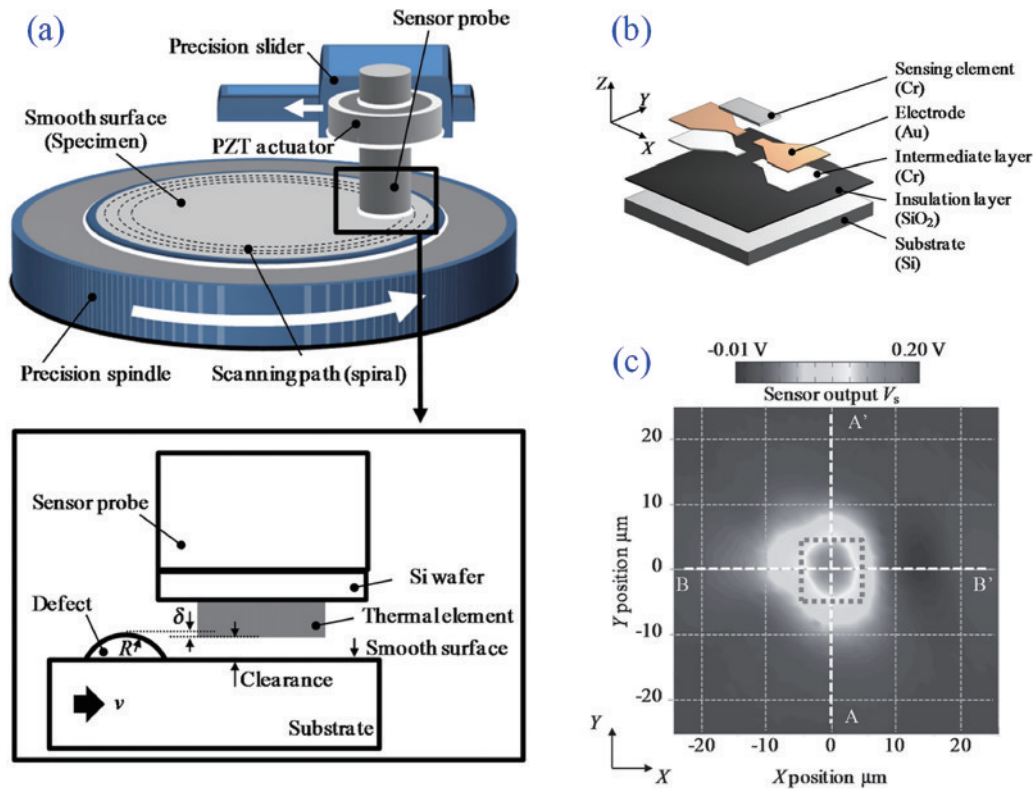


图 14 晶圆缺陷的热成像检测方法。(a)基于热效应的晶圆缺陷检测系统装置示意图;(b)热探测单元结构原理图;(c)热探测单元的一幅典型热输出轮廓图像^[212]

Fig. 14 Thermal imaging inspection for defects in the wafer. (a) Schematic diagram of wafer inspection system based on thermal effects; (b) structural schematic diagram of thermal detection unit; (c) a typical thermal profile image reported by the thermal detection unit^[212]

4 图案化晶圆缺陷检测处理算法

从最简单的图像差分算子到复杂的图像合成算

法^[215],图案化晶圆缺陷检测中的后处理算法通过提高 SNR 和缺陷对比度而在光学缺陷检测中发挥关键作用。在本节中,将简要回顾光学缺陷检测领域中最先

进的后处理算法。

4.1 光学缺陷检测后处理算法

“Die-to-Die”检测方法将无缺陷芯片区域的图像与有缺陷芯片区域的图像进行比较,以识别逻辑芯片中的各类缺陷,其也被称为随机检测^[216]。“Cell-to-Cell”检测方法将同一芯片中周期单元的图像与相邻周期单元的图像进行比较,以识别存储芯片中的各类缺陷^[217],其也被称为阵列检测。“Die-to-Database”检测方法使用差分图像(设计布局的建模图像数据库图像与目标图像作差分处理而获得)来识别晶圆上的系统缺陷^[218]。要从原始图像中识别缺陷,关键是确保后处理图像(例如差分图像)中的缺陷特征信号强度显著大于预定义的阈值^[219]。Henn等^[220]提出了一种基于差分图像的标准差和面积阈值的方法,来实现缺陷特征信号与背景噪声信号之间的分离。Zhou等^[130]使用二阶图像差分来消除周期性背景图案,然后将全景图像与所匹配的三极子图案进行卷积运算,这极大地提高了缺陷特征信号的对比度。在该方法中,他们定义了峰值信噪比(PSNR)来评估感兴趣缺陷的可检测性,该评价函数 PSNR 的表达式为 $20 \cdot \log_{10} [D_{\max} - D_{\min} / (\sigma_n + \sigma_i)]$ ^[101],其中 D_{\max} 与 D_{\min} 分别是指差分图像中缺陷区域的最大信号强度与最小信号强度, σ_n 和 σ_i 分别是指噪声和全景图像的标准差。KLA-Tencor 也提出了多芯片区域自动阈值(MDAT)检测算法和在线缺陷管理(IDO)过滤算法,以实现高效率、高灵敏度的在线缺陷检测^[221-222]。MDAT 算法利用多个芯片区域的信息来创建一个中值图像,并将该中值图像用作阈值参考,以降低工艺噪声并改善缺陷提取^[221]。IDO 过滤算法利用特征向量等多个缺陷属性来自动组织和消除滋扰缺陷^[222]。随着亚 10 nm 节点工艺成为主流^[223-224],多重图案化、高 NA 极紫外光刻等先进光刻技术将广泛应用于 IC 芯片制造生产线。传统光学明场检测方法需要结合“Die-to-Database”、分辨率增强等多种检测算法,以提高检测灵敏度和检测效率。

当前,最先进的依靠图像差分实现检测的和依靠规则合并输出实现分类的光学与电子束检测系统是强制性的,并且对不同缺陷类型、缺陷尺寸、基底材料并非不可变化的^[87,225]。由于众所周知的衍射极限障碍^[226],工作波长位于深紫外和可见光波段内的光学缺陷检测工具对亚 10 nm 尺寸的晶圆缺陷进行分类比对该缺陷的识别更困难。进一步地,每一项新技术均会带来新的挑战,并且需要集成芯片制造商进行大量的设置、调试和手动调整工艺参数。相比之下,深度学习提供了一种相对易于实现的方法来应对缺陷检测中的挑战^[227],包括但不限于缺陷的识别、定位和分类^[228]。一般来说,基于深度学习的缺陷检测工作流程非常简单,即捕获足够多的晶圆电子束图像或光学图像(既可以是实验观测的,也可以是模拟产生的),训练所选定的神经网络以直接从图像中提取有用的特征,随后用

一组较小的样本集来测试所训练的模型,并根据表征神经网络置信度的预定义成本函数来决定是否应该重复训练^[229]。根据神经网络中非线性变换的类型和阶次,深度学习模型可以分为不同的类别^[230]。卷积神经网络(CNN)适用于图像等具有层次结构的数据^[231],已使其成为缺陷检测领域极具吸引力的选择。国内浙江大学郝鑫等^[232]提出了两种基于晶圆缺陷扫描电镜图像的缺陷智能检测与分类算法,一种是在 ZFNet 卷积神经网络算法的基础上所构建的基于块的卷积神经网络缺陷检测算法,另一种是通过改进 Faster RCNN 分类器所建立的缺陷智能检测算法,从而实现晶圆缺陷的高效、精确检测。西安交通大学杨静等^[233]在仿射迭代最近点算法的内核基础上提出了基于图像形状配准的晶圆分割方法,这为图案化晶圆缺陷检测所涉及的图像分割、拼接和配准等问题提供了参考。Chien 等^[234]已使用 CNN 来识别和分类中心、局部、随机和划痕等表面缺陷。在他们所提出的方法中,从 WM-811K 数据集中在线收集了 25464 张具有可见缺陷的原始图像,该 WM-811K 数据集包含来自 46393 个批次的 811457 张带有 8 个缺陷标记的半导体晶圆图像。为了保证均匀性,每个原始图像都遭受了将晶圆外图像区域进行黑化的预处理,从而只提取包含晶圆的区域。实验结果表明,CNN 可以达到 98% 以上的准确率。Cheon 等^[235]使用单个 CNN 模型来提取有效特征,以识别使用基于 SEM 图像的传统自动缺陷分类系统所忽略掉的缺陷类别。更多有关基于深度学习的缺陷检测文献可在参考文献^[236-237]中找到。然而据我们所知,大多数已报告的研究都是基于缺陷几乎不可见的原始图像(例如,SEM 图像)。对于缺陷远小于波长的光学图像,有用的缺陷特征信号被淹没于背景图像中,并且会受到来自硬件端或软件端的不同类型误差的干扰,使得缺陷难以显现在原始光学图像中。因此,根据光学图像来定位和分类深亚波长尺度的缺陷是非常具有挑战性的。Purandare 等^[8]引入了一种结合了主成分分析(PCA)和模拟光学图像的机器学习技术,从而能够在原始光学图像中挖掘出缺陷特征。具体来说,他们转换了一些近似的电磁模拟缺陷图像,以生成具有可训练参数的合成噪声缺陷图像,使其主成分能够充分捕捉与缺陷特征相关的方差。在 22 nm 和 9 nm 节点处检测平行和垂直缺陷的实验结果表明,即使缺陷比衍射极限小一个数量级,分类系统也能实现缺陷的准确定位和分类。然而,此方法尚未证明其对其他类型缺陷(如孤立和掩埋缺陷)的鲁棒性。Henn 等^[238]基于 SEMATECH 所定义的三维场效应晶体管模型所产生的模拟光学图像研究了线性分类器和 CNN 对缺陷检测的影响。他们的模拟结果表明,CNN 的性能优于线性分类器和 SNR,并且该方法很可能能够将缺陷可检测性拓展至在一个维度上特征尺寸仅为照明光波长 1/20 的缺陷上。综上所述,尽管深度学习已成为一

种颇具吸引力的图像处理工具,但在实际 IC 芯片生产线上并未被广泛接受,尤其是在光学检测方面。原因可能不仅包括“黑盒性质”和缺乏可解释性,还包括未经证实的从纯光学图像中定位和分类深亚波长缺陷的能力。为了让深度学习技术真正应用于 IC 芯片制造厂的光学缺陷检测场景,还需要开展更多的研究工作,尤其是针对深度学习在光学缺陷检测应用中的灰色地带的深入研究,以及深度学习与光学物理之间边界的进一步探索。

4.2 基于电子成像原理的后处理算法

面向电子成像缺陷检测原理的后处理算法,具有与光学缺陷检测所用后处理算法高度相似的解决思路,仍然是将检测图像与参考图像作比对分析以实现缺陷的识别与定位,并根据缺陷的外观开展自动缺陷分类(ADC)。那么,参考图像的质量直接决定了缺陷检测的正确率。Okuda 等^[239]充分利用存储芯片中电路图案的周期性,对图像进行平均处理以得到无缺陷芯片的高 SNR 参考图像并与检测图像比对,相较于直接利用两帧图像进行周期错位差分的处理算法,其对于 20 nm 缺陷检测率从 61% 提高至 88%。Oh 等^[240]将不同位置的多达 128 幅图像进行叠加处理,可从统计上消除缺陷像素的影响,并能够合成功形状波动较小的参考图像,如图 15 所示。除了直接使用检测图像构建参考图像之外,Levi 等^[241]依靠先进的 SEM 模拟方法构建了从设计布局到 SEM 仿真图像之间的桥梁,并将仿真的 SEM 图像作为参考图像与真实 SEM 图像进行差分处理,从而实现缺陷的可靠检测。随着先进的 EUV 光刻及多重曝光技术向 10 nm 及以下节点发展,

可能会引起难以预料的缺陷^[242],因此需要对整片晶圆表面进行高速检测^[243],而 D2DB 方法能够摒弃参考图像而将晶圆图案与设计布局进行直接比较^[244],并利用几何验证引擎(GVE)实现 SEM 图像与设计数据的高速比对^[245]。然而,实际上最终制造的电路图案往往存在一定的变形,难以与设计布局达成高度的一致性,这导致 D2DB 方法容易将晶圆图案的正常变形错误地识别为缺陷^[246]。为此,Ouchi 等^[243]提出了一种基于深度学习的 D2DB 检测方法,如图 16(a)所示,其仅需要学习正常图像的光度分布即可实现缺陷变形与正常变形的可靠区分,这将避免对多样化缺陷图像的训练要求。该方法可以在每像素 1、2、3、4 nm 的分辨率下成功地检出所有缺陷,在 4 nm 分辨率下的最高检测速率可达 1.25 h/mm²。随后,Kondo 等^[247]同时依靠低速高 SNR 与高速低 SNR 图像数据建立了机器学习模型,并实现了每像素 4 nm 至每像素 1 nm 的超分辨,以用于高速成像与缺陷检测。以上研究工作均只完成了“是不是”的判别,而对于“是什么”,即缺陷的分类,还需要执行 ADC 过程。ADC 从缺陷图像中提取各类缺陷的大小、长度、高度、纹理等特征,并将其作为特征向量进行分类,分类的方式主要是基于规则和基于学习等两种策略^[246]。基于规则的分类方式根据预先给定的规则对缺陷进行分类,不需要提前采集大量样本,但规则本身的建立需要足够丰富的先验知识,且分类标准也并不灵活。而基于学习的分类方式使用预先收集的缺陷样本创建训练数据集,随后根据特征向量的统计特性进行分类,但在样本数据不足的情况下,其分类效果的鲁棒性较差。

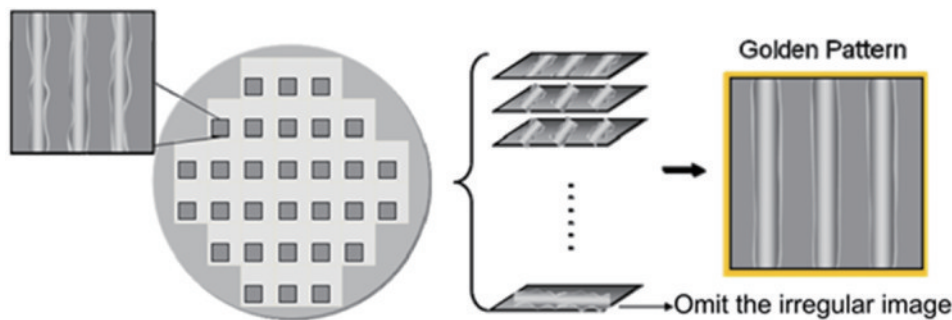


图 15 参考图像质量的提升^[240]

Fig. 15 Quality improvement of the reference image^[240]

尽管目前已经开发了部分缺陷检测工具,如用于热点检查的电子束检查工具 SkyScanTM 5000^[248]、嵌入了人工智能缺陷检测系统的 eProbe ®250^[249],以及用于 HMI eScan320 电子束检查工具的 D2DB 系统

SupernovaTM^[250]。然而,针对实现整片晶圆的高通量缺陷定位和自主识别这一需求,还需进一步优化检测策略并结合深度学习等新兴技术,使之向快速、精准、智能的方向持续发展。

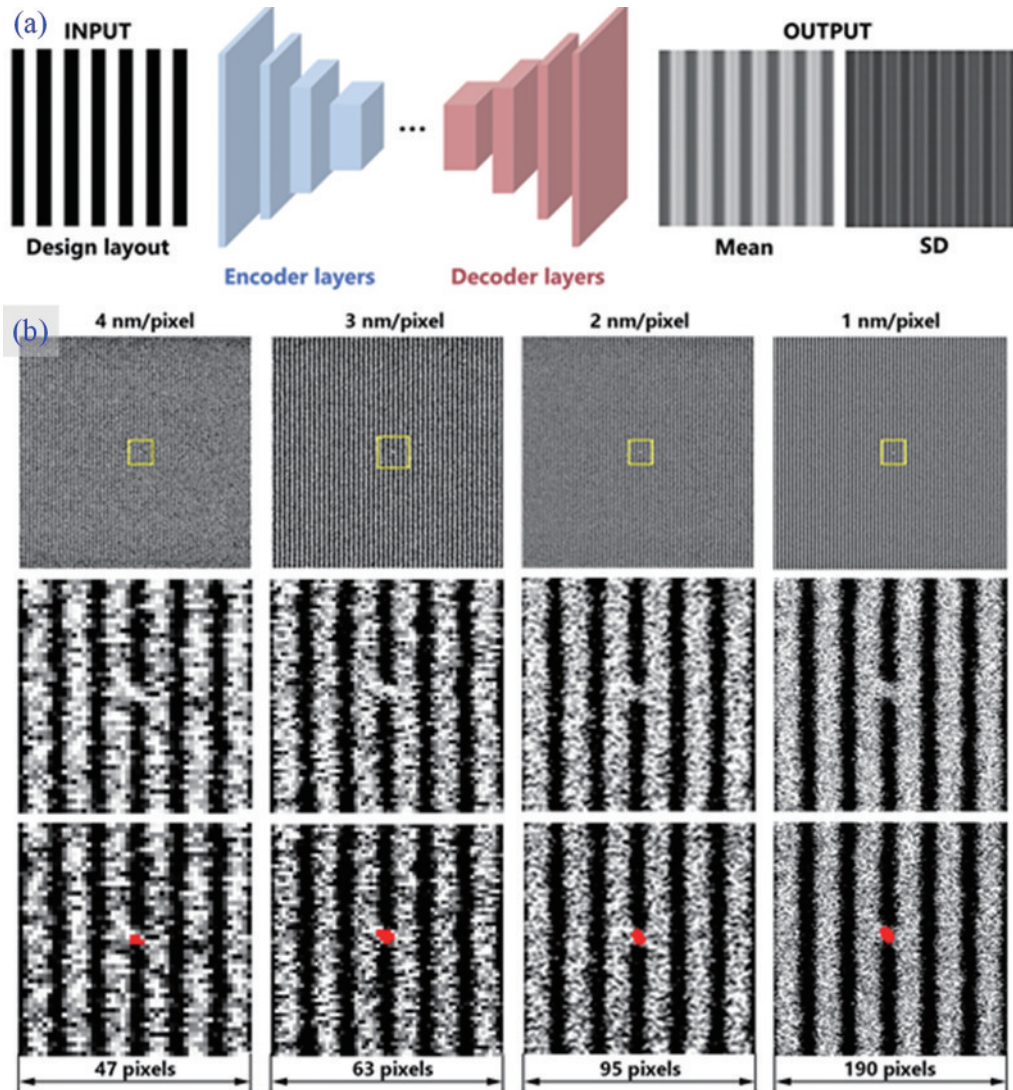


图 16 D2DB 方法与相应结果^[243]。(a)由卷积神经网络构成的可训练 D2DB 系统；(b)可训练 D2DB 在 1~4 nm/pixel 均可检测出中间桥接缺陷(上图为缺陷图像,黄色方框内为缺陷位置;中图为黄色方框的放大图;下图为检测结果)

Fig. 16 D2DB method and the corresponding results^[243]. (a) A trainable D2DB algorithm based on the convolutional neural networks; (b) central bridge defects detected by using the trainable D2DB algorithm under the conditions of 1 nm/pixel~4 nm/pixel (upper is aerial images of defective pattern with defect located in the yellow box, middle is enlarged view of defect feature located in the yellow box, bottom is test results)

5 结束语

本文以主流的晶圆缺陷光学检测为主线,系统地阐述了多种潜在的晶圆缺陷检测新技术与新方法。此外,多电子束成像与热成像效应的缺陷检测手段,也在正文中加以阐述,以给读者一个更加全面的晶圆缺陷检测领域全貌。对于光学缺陷检测,除了对传统基于光强成像和后处理算法的检测模式进行阐述之外,本文也重点介绍了基于相位、偏振显微成像、轨道角动量、太赫兹波、布洛赫模和 X 射线叠层衍射成像的缺陷检测新方法。从应用层面而言,基于振幅/光强的光学缺陷检测是当前晶圆制造厂的主流缺陷检测手段。根据瑞利散射公式,直径为 d 的深亚波长纳米结构在波长为 λ 的非偏振光照明下,其瑞利散射截面与

d^6/λ^4 成正比。因此,基于光学振幅的检测系统本质上对深亚波长缺陷是不敏感的。为了提高 SNR 和缺陷的对比度,一种可行的方法是基于特定的结构利用特殊的光学激发手段来增强缺陷 SNR。例如,对于 3D NAND 这种具有多层纵向周期薄膜特征的纳米结构,在本质上类似于集成光学中常见的衍射布拉格光栅 (DBG),其可以利用周期薄膜结构所特有的光学布洛赫模和振荡特征来放大掩埋型缺陷的光学信号。然而,这种方法不具有普适性,仅能实现具有纵向薄膜周期分布特征的纳米结构的缺陷检测。与之相反,基于光学相位的缺陷检测系统是一种通用型成像系统,但其又不同于基于幅值/光强的缺陷检测系统,因为理论上相位与缺陷的高度成正比(而非 d^6/λ^4 的比例关系),这使得相位测量成为一种潜在的、高灵敏的缺陷检测

方法。对于单色光而言,自旋角动量密度和轨道角动量密度分别反映了电磁场的内禀属性和外禀属性,且两者均具有一定的空间分布特性,这至少在原理上表明,可以通过为给定的纳米结构图案定制照明光场的方法来优化缺陷的灵敏度。不同于上述任何光学缺陷检测技术,X射线叠层衍射成像是一种可以直接对整个晶圆图形(包括表面和亚表面结构)进行亚 20 nm 分辨率 3D 成像的光学检测方法。因硬 X 射线极佳的材料穿透能力与其超高的全 3D 解析能力,表面下的电介质与金属材质缺陷均能够通过直接成像的方式而被检测出。然而,由于 X 射线叠层衍射成像技术需要高相干性、高亮度的 X 射线光源,目前往往只能基于同步辐射光源来开展,且当前的叠层衍射成像算法需要对待测样品进行不间断连续扫描与算法重构,这在一定程度上影响了晶圆缺陷检测效率。多电子束成像检测方法,具有天然的高横向分辨率特征,并且多电子束并行检测-并行成像探测的模式也线性地提升了缺陷检测效率。然而,电子是一种费米子,其固有的电子间排斥

力效应导致两束电子束的间距难以无限缩小。尽管可以采用更多电子束来规避电子束间距大所引起的低扫描效率问题,但引入更多电子束会造成系统复杂度提升、探头增多、图像难拼接和难配准等严重问题。基于热成像的检测技术是基于热效应在有缺陷区域的热密度分布显著不同于无缺陷区域的特点,来实现缺陷的定位与检测。对于无图形晶圆上的滑槽、凹坑、颗粒等缺陷,局部热效应会有显著的特征,然而对于有图形晶圆上的缺陷,这种局部热成像的灵敏度会有多大,能否被传统热成像探头检测出来,需要更深入的研究。

随着现代集成电路中材料和晶体管几何结构的复杂性不断增加,单一缺陷检测技术已经越来越难以适用多种复杂场景,多种系统的组合以应对各种复杂检测挑战将是一种趋势。尽管如此,从学术角度看,我们大胆预测晶圆缺陷检测领域将沿着四条主线方向不断发展,如图 17 所示。第一条路线是基于传统明场照明、暗场照明的光学检测手段,无论是技术成熟度、通用性,还是可靠性角度,传统晶圆缺陷光学检测技术在

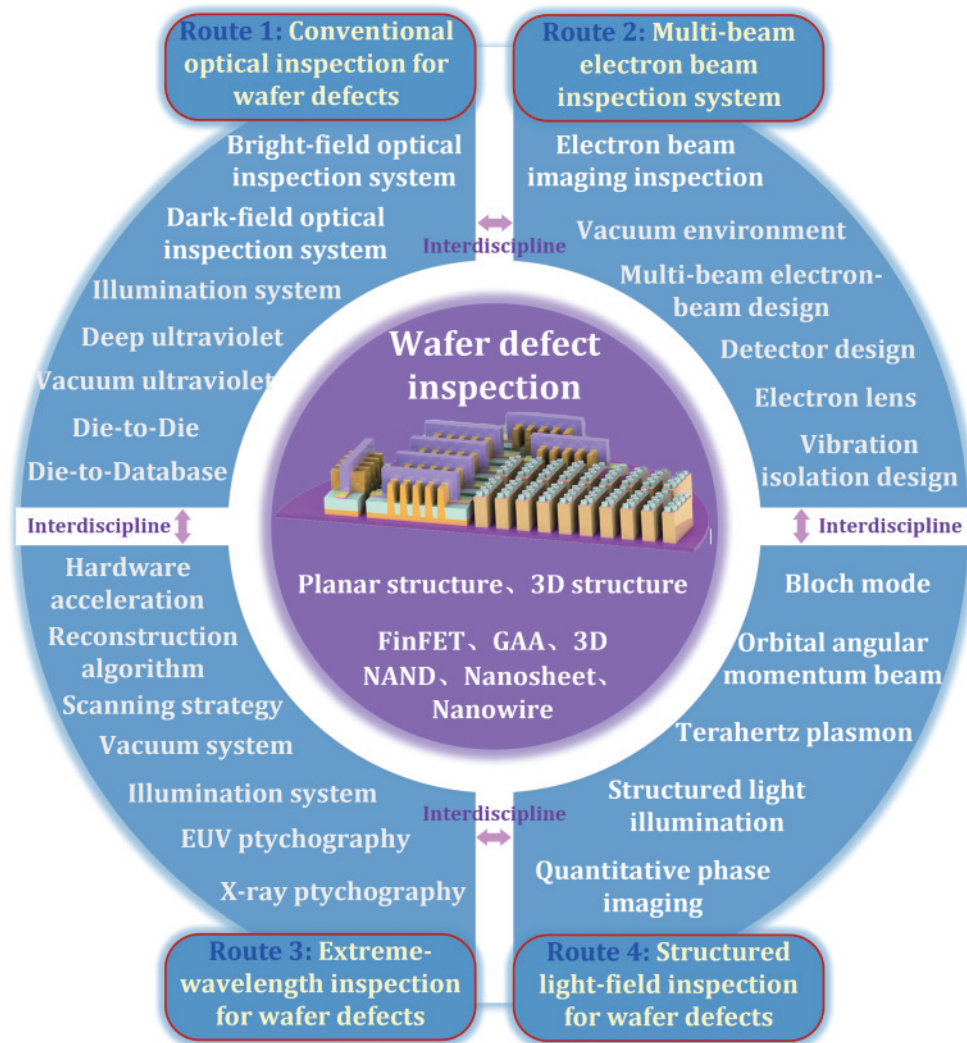


图 17 晶圆缺陷检测领域概述及潜在发展路线图

Fig. 17 Summary and roadmap of patterned wafer defect inspection

以 KLA-Tencor 为代表的行业巨头的持续引领下已经获得了晶圆制造厂的普遍认可,然而需要指出的是,传统光学缺陷检测技术因其检测原理受限于瑞利散射,难以保证对先进节点晶圆缺陷的高灵敏度,因此不同缺陷的信噪比预分析尤为重要。第二条路线是基于极短波长的晶圆缺陷检测,如基于极紫外与硬 X 射线波段的叠层衍射成像技术,这其中尤以 X 射线叠层衍射技术有望实现对晶圆表面及亚表面缺陷的 3D 成像,然而,到目前为止,高亮度、高相干性、高稳定性的台式极短波长光源的缺失仍然是制约极短波长晶圆检测技术效率、分辨率、稳定性的关键因素,此外,如何通过算法优化与硬件加速策略来提升海量测量数据的计算效率亦是一个潜在的研究重点。第三条路线是基于多电子束的缺陷检测,秉持固有的高横向分辨率特征与“所见即所得”的观点,多电子束成像也是被业界寄予厚望的检测方案,然而,电子之间固有的排斥力导致电子束间距难以持续微缩,尽管可以通过更多的电子束来提升检测效率,但相比较于光学检测手段而言其检测速率依然具有量级的差别,如何在系统复杂度、整机成本与检测效率之间取得平衡是多电子束检测方案的一个潜在研究热点。第四条路线是基于结构光场特征的光学检测方法,即充分发掘光作为一种三维电磁场所具有的多维度内禀特征,来实现缺陷检测灵敏度的最大化。传统的光学检测手段,是利用照明光束的振幅特征,在明场、环形、偶极和四极照明模式下实现晶圆缺陷检测。然而,光作为一种电磁波,除了振幅以外,还具有频率、相位、偏振态(自旋角动量)、轨道角动量等多个固有特征,这为多模态光学缺陷检测奠定了物理基础^[251]。以相位为例,相位光程差与缺陷高度之间是线性相关的,这比传统基于振幅的光学检测技术(基于瑞利散射理论)在理论上具有更高的信噪比。此外,光场具有内禀的自旋角动量密度与外禀的轨道角动量密度,缺陷对光场角动量密度的扰动有望作为一种全新的缺陷检测手段,但需要指出的是,缺陷检测往往需要在光学远场进行,因此需要防止在照明光场中引入具有一定“自修复”特性的涡旋光场,进而避免缺陷引入的扰动信号在反射光传播过程中被逐渐弱化。如果被测 IC 芯片进一步地具有某种特殊几何构造,如 3D NAND 闪存芯片的纵向周期层状结构,则可以利用类似衍射布拉格光栅的带通效应,选择具有一定频率的相干光利用干涉效应来实现掩埋型缺陷的信号放大与探测。以上四条晶圆检测路线相互之间并不独立,随着待测缺陷由表面转为三维分布、几何结构越来越复杂、尺寸逐步逼近原子尺度,晶圆缺陷的检测也变得越来越复杂,多种检测技术的相互组合将越来越重要。我们相信,晶圆缺陷检测虽然是一个长期存在的工程问题,但随着消费电子、智能设备的爆炸式增长以及纳米光子学、电子成像、光热成像、结构光场、计算成像、定量相位成像和深度学习等新兴技术的融合,晶圆缺

陷检测正逐步走上舞台,成为一个以应用为导向、学术和工程相互交叉的前沿课题。笔者深知,一己之力难以击石,唯有集众家之长、举体制之力,方能攻克晶圆缺陷检测领域的壁垒。而此文,仅以笔者拙见,梳理此领域,另做抛砖引玉,以期更多领域同行、初学者做好铺垫与引路之用。

参 考 文 献

- [1] International Roadmap for Devices and Systems (IRDS)-More Moore[EB/OL]. [2022-08-09]. <https://irds.ieee.org/editions/2020/more-moore>.
- [2] Kundaliya D. TSMC to begin 3nm mass production in 2021, report[EB/OL]. (2020-07-20)[2022-08-09]. <https://www.computing.co.uk/news/4017969/tsmc-begin-3-nm-mass-production-2021-report>.
- [3] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. Nature Electronics, 2018, 1(10): 532-547.
- [4] Vikram A, Lin K, Camp J, et al. Inspection of high-aspect ratio layers at sub 20 nm node[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8681: 86811Q.
- [5] Ma Z Y, Seiler D G. Metrology and diagnostic techniques for nanoelectronics[M]. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017.
- [6] Broadbent W, Yokoyama I, Yu P, et al. Field results from a new die-to-database reticle inspection platform[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6607: 660714.
- [7] Liu C, Xu S, Liu Y F, et al. Aperture design for a dark-field wafer defect inspection system[J]. Applied Optics, 2021, 60(35): 10830-10837.
- [8] Purandare S, Zhu J L, Zhou R J, et al. Optical inspection of nanoscale structures using a novel machine learning based synthetic image generation algorithm[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17743-17762.
- [9] Pan B Y, Yang Y, Bian J, et al. Quantum dot decorated nano-pyramid fiber tip for scanning near-field optical microscopy[J]. Optics Communications, 2019, 445: 273-276.
- [10] Bek A, Vogelgesang R, Kern K. Apertureless scanning near field optical microscope with sub-10 nm resolution [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(4): 043703.
- [11] Liu Y, Liu J, Dai H, et al. Photo-aging evaluation - *in vitro* biological endpoints combined with collagen density assessment with multi-photon microscopy[J]. Journal of Dermatological Science, 2022, 105(1): 37-44.
- [12] Faria A R, Silvestre O F, Maibohm C, et al. Cubosome nanoparticles for enhanced delivery of mitochondria anticancer drug elesclomol and therapeutic monitoring via sub-cellular NAD(P)H multi-photon fluorescence lifetime imaging[J]. Nano Research, 2019, 12(5): 991-998.
- [13] Li Y, Yang J, Pan Z, et al. Nanoscale pore structure and mechanical property analysis of coal: an insight combining AFM and SEM images[J]. Fuel, 2020, 260: 116352.
- [14] Jiao F, Cannon K S, Lin Y C, et al. The hierarchical

- assembly of septins revealed by high-speed AFM[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5062.
- [15] Madsen J, Liu P, Kling J, et al. A deep learning approach to identify local structures in atomic-resolution transmission electron microscopy images[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2018, 1(8): 1800037.
- [16] Zhang D L, Zhu Y H, Liu L M, et al. Atomic-resolution transmission electron microscopy of electron beam-sensitive crystalline materials[J]. *Science*, 2018, 359(6376): 675-679.
- [17] Iida S, Nagai T, Uchiyama T. Standard wafer with programmed defects to evaluate the pattern inspection tools for 300-mm wafer fabrication for 7-nm node and beyond [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2019, 18(2): 023505.
- [18] Kolenov D, Pereira S F. Machine learning techniques applied for the detection of nanoparticles on surfaces using coherent Fourier scatterometry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19163-19186.
- [19] Solecky E, Patterson O D, Stamper A, et al. In-line E-beam wafer metrology and defect inspection: the end of an era for image-based critical dimensional metrology? New life for defect inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8681: 86810D.
- [20] Mukhtar M. Assessing a multi-electron beam application approach for semiconductor process metrology[M]. New York: State University of New York Polytechnic Institute, 2018.
- [21] Sentenac A, Chaumet P C, Belkebir K. Beyond the Rayleigh criterion: grating assisted far-field optical diffraction tomography[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(24): 243901.
- [22] Ohkubo A, Lee J, Kim H, et al. Signal-to-noise ratio evaluation for the nanometer-scale patterned defect inspection using dark-field microscopy with tailored polarization illumination[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11485: 114850N.
- [23] Miles R B, Lempert W R, Forkey J N. Laser Rayleigh scattering[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(5): R33-R51.
- [24] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering by an arbitrary particle[M]//Absorption and scattering of light by small particles. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007: 57-81.
- [25] Crimmins T. Wafer noise models for defect inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7971: 79710E.
- [26] Iida S, Nagai T, Uchiyama T. Development of standard samples with programmed defects for evaluation of pattern inspection tools[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10959: 109590J.
- [27] Lim K, Choi S, Cho W, et al. An analysis of correlation between scanning direction and defect detection at ultra high resolution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7823: 782334.
- [28] You Y M, Du C L, Ma Y, et al. Effect of near-field coupling on far-field inelastic scattering imaging of gold nanoparticles[J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(39): 395705.
- [29] Golani O, Dolev I, Pond J, et al. Simulating semiconductor structures for next-generation optical inspection technologies[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(2): 025102.
- [30] Zhu Z R, Swecker A L, Strojwas A J. METRO-3D: an efficient three-dimensional wafer inspection simulator for next-generation lithography[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, 17(4): 619-628.
- [31] Rommelfanger N J, Ou Z H, Keck C H C, et al. Differential heating of metal nanostructures at radio frequencies[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(5): 054007.
- [32] Mayergoyz I D, Fredkin D R, Zhang Z Y. Electrostatic (plasmon) resonances in nanoparticles[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(15): 155412.
- [33] Park S W, Park G, Kim Y, et al. Through-focus scanning optical microscopy with the Fourier modal method[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11649-11657.
- [34] Arceo A, Bunday B, Vartanian V, et al. Patterned defect and CD metrology by TSOM beyond the 22-nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8324: 83240E.
- [35] Attota R, Silver R. Nanometrology using a through-focus scanning optical microscopy method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(2): 024002.
- [36] Attota R, Kramar J. Optimizing noise for defect analysis with through-focus scanning optical microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 977811.
- [37] Ishii R, Funato M, Kawakami Y, et al. Pushing the limits of deep-ultraviolet scanning near-field optical microscopy[J]. *APL Photonics*, 2019, 4: 070801.
- [38] Henn M A, Zhou H, Silver R M, et al. Applications of machine learning at the limits of form-dependent scattering for defect metrology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10959: 109590Z.
- [39] Manser R. EUV microscopy: a unique approach for materials characterization[J]. *PhotonicsViews*, 2019, 16(3): 42-45.
- [40] Hunsche S, Jochemsen M, Jain V, et al. A new paradigm for in-line detection and control of patterning defects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9424: 94241B.
- [41] Hashimoto K, Usui S, Yoshida K, et al. Hot spot management with die-to-database wafer inspection system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6925: 692517.
- [42] Buengener R. Defect inspection strategies for 14 nm semiconductor technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8466: 846607.
- [43] Wong A K. Optical Imaging in Projection Microlithography[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [44] Hopkins H. On the diffraction theory of optical images[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1953, 217: 408-432.
- [45] Peng D P, Hu P, Tolani V, et al. Toward a consistent and accurate approach to modeling projection optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7640: 76402Y.
- [46] 陈国栋, 张子南, 李思坤, 等. 深紫外计算光刻技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922007.

- Chen G D, Zhang Z N, Li S K, et al. Study on deep ultraviolet computational lithography techniques[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922007.
- [47] 施伟杰, 俞宗强, 蒋俊海, 等. 芯片制造语境下的计算光刻技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922001.
- Shi W J, Yu Z Q, Jiang J H, et al. Computational lithography technology under chip manufacture context [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922001.
- [48] 袁淼, 孙义钰, 李艳秋. 先进计算光刻[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922009.
- Yuan M, Sun Y Y, Li Y Q. Advanced computational lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922009.
- [49] 马旭, 张胜恩, 潘毅华, 等. 计算光刻研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922008.
- Ma X, Zhang S G, Pan Y H, et al. [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922008.
- [50] 董正琼, 刘世元, 陈修国, 等. 基于灵敏度分析的一维纳米结构光学散射测量条件优化配置[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(1): 116-122.
- Dong Z Q, Liu S Y, Chen X G, et al. Optimization of measurement configuration in optical scatterometry for one-dimensional nanostructures based on sensitivity analysis[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(1): 116-122.
- [51] Dong Z Q, Liu S, Chen X, et al. Determination of an optimal measurement configuration in optical scatterometry using global sensitivity analysis[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 562: 16-23.
- [52] Lee B H, Chin S B, Cho D H, et al. Optical characterization of defects on patterned wafers: exploring light polarization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5375: 849-858.
- [53] Lee B H, Ihm D C, Yeo J H, et al. Polarization control for enhanced defect detection on advanced memory devices[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6152: 61521Q.
- [54] Yang Y, Jeong Y, Numata M, et al. A study of the defect detection technology using the optic simulation for the semiconductor device[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8880: 88801S.
- [55] Fujii T, Konno Y, Okada N, et al. Development of optical simulation tool for defect inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7272: 72721A.
- [56] Barnes B M, Quintanilha R, Sohn Y J, et al. Optical illumination optimization for patterned defect inspection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7971: 79710D.
- [57] Barnes B M, Goasmat F, Sohn M Y, et al. Enhancing 9 nm node dense patterned defect optical inspection using polarization, angle, and focus[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8681: 86810E.
- [58] Barnes B M, Goasmat F, Sohn M Y, et al. Effects of wafer noise on the detection of 20-nm defects using optical volumetric inspection[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(1): 014001.
- [59] Barnes B M, Henn M A, Sohn M Y, et al. Assessing form-dependent optical scattering at vacuum- and extreme-ultraviolet wavelengths of nanostructures with two-dimensional periodicity[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(6): 064056.
- [60] Wang Y G, Neureuther A, Naulleau P. Enhancing native defect sensitivity for EUV actinic blank inspection: optimized pupil engineering and photon noise study[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9776: 97761D.
- [61] Wang Y G, Neureuther A R, Naulleau P P. Impact of noise sources and optical design on defect detection sensitivity in extreme ultraviolet actinic pattern inspection tool[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2017, 16(1): 013504.
- [62] Wang Y G, Neureuther A R, Naulleau P P. Impact of tool design on defect detection sensitivity in extreme ultraviolet actinic blank inspection[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2017, 16(2): 023502.
- [63] Mochi I, Helfenstein P, Rajeev R, et al. Actinic inspection of EUV reticles with arbitrary pattern design [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10450: 1045007.
- [64] Fernandez S, Kazazis D, Rajeev R, et al. A comparative study of EUV absorber materials using lensless actinic imaging of EUV photomasks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10583: 105831H.
- [65] Zhu J L, Lin J M, Xu T L, et al. Optical wafer defect inspection at the 10 nm technology node and beyond[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4 (3): 032001.
- [66] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. *Scattering, absorption, and emission of light by small particles*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [67] van de Hulst H C. *Light scattering by small particles*[M]. New York: Dover Publications, 1981.
- [68] Crimmins T F. Defect metrology challenges at the 11-nm node and beyond[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7638: 76380H.
- [69] Born M, Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [70] Palik E D. *Handbook of optical constants of solids*[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [71] Pierce D T, Spicer W E. Electronic structure of amorphous Si from photoemission and optical studies[J]. *Physical Review B*, 1972, 5(8): 3017-3029.
- [72] Virk K S. Fast computation of scattering by isolated defects in periodic dielectric media[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(6): 1763-1775.
- [73] Meshulach D, Dolev I, Yamazaki Y, et al. Advanced lithography: wafer defect scattering analysis at DUV[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7638: 76380K.
- [74] Sohn Y J, Quintanilha R, Barnes B M, et al. 193 nm angle-resolved scatterfield microscope for semiconductor metrology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7405: 74050R.
- [75] Barnes B M, Sohn M Y, Goasmat F, et al. Three-

- dimensional deep sub-wavelength defect detection using $\lambda=193$ nm optical microscopy[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26219-26226.
- [76] Silver R M, Barnes B M, Sohn Y, et al. The limits and extensibility of optical patterned defect inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7638: 76380J.
- [77] Ito C, Durant S, Lange S, et al. Inspection of directed self-assembly defects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9049: 90492D.
- [78] Barnes B M, Sohn Y J, Goasmat F, et al. Scatterfield microscopy of 22-nm node patterned defects using visible and DUV light[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8324: 83240F.
- [79] Guo V W, Jiang F, Trichtkov A, et al. SRAF requirements, relevance, and impact on EUV lithography for next-generation beyond 7 nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10583: 105830N.
- [80] Fujiwara H. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- [81] Fox M. *Optical properties of solids*[M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [82] Altamirano M, Skumanich A. Enhanced defect detection capability using combined brightfield/darkfield imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3509: 60-64.
- [83] McMackin I, Perez J, Selinidis K, et al. High resolution defect inspection of step and flash imprint lithography for 32 nm half-pitch patterning[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6921: 477-488.
- [84] Liu D, Wang S, Cao P, et al. Dark-field microscopic image stitching method for surface defects evaluation of large fin optics[J]. *Optics Express* 2013, 21(5): 5974-5987.
- [85] Tian M, Zhang Y, Guan T, et al. Critical defect detection, monitoring and fix through process integration engineering by using D2DB pattern monitor solution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10962: 109620L.
- [86] Nakazawa T, Kulkarni D V. Wafer map defect pattern classification and image retrieval using convolutional neural network[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, 31(2): 309-314.
- [87] Leray P, Halder S, Lorenzo P D, et al. Study of design-based e-beam defect inspection for hotspot detection and process window characterization on 10 nm logic device[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97780O.
- [88] Kitamura T, Hasebe T, Kubota K, et al. Die-to-Database verification tool for detection cd errors, which are caused by opc features, by using mass gate measurement and layout information[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6518: 651834.
- [89] Ma E, Chou K, Liu X D, et al. Multiple beam technology development and application for defect inspection on EUV wafer/mask[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10810: 1081014.
- [90] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [91] Çapoğlu İ R, Rogers J D, Taflove A, et al. The microscope in a computer: image synthesis from three-dimensional full-vector solutions of Maxwell's equations at the nanometer scale[M]//*Progress in optics*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-91.
- [92] Peng D P, Li Y, Satake M, et al. AIMS D2DB simulation for DUV and EUV mask inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8352: 835209.
- [93] Yoshioka T, Miyoshi T, Takaya Y. Particle detection for patterned wafers of 100 nm design rule by evanescent light illumination: analysis of evanescent light scattering using finite-difference time-domain (FDTD) method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6049: 604909.
- [94] Swecker A L, Strojwas A J, Levy A, et al. Characterization of defect detection schemes using rigorous 3D EM field simulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3050: 313-321.
- [95] Iida S, Nagai T, Uchiyama T. Development of standard samples with programmed defects for evaluation of pattern inspection tools for 7-nm and smaller nodes[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2019, 18(3): 033503.
- [96] Lauper M, Fromme P, Robyr J L, et al. Silicon wafer defect detection using high frequency guided waves[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10600: 106000G.
- [97] Zhao Q, Yang H, Nie B B, et al. Wafer-scale and cost-effective manufacturing of controllable nanogap arrays for highly sensitive SERS sensing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(2): 3580-3590.
- [98] Wang C, Chen X G, Chen C, et al. Reconstruction of finite deep sub-wavelength nanostructures by Mueller-matrix scattered-field microscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32158-32168.
- [99] Yang S, Taflove A, Backman V. Experimental confirmation at visible light wavelengths of the backscattering enhancement phenomenon of the photonic nanojet[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7084-7093.
- [100] Feng X B, Su R, Happonen T, et al. Fast and cost-effective in-process defect inspection for printed electronics based on coherent optical processing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13927-13937.
- [101] Zhou R J, Edwards C, Popescu G, et al. 9 nm node wafer defect inspection using visible light[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9050: 905017.
- [102] Xu J M, Liu Y, Wu Y L. Automatic defect inspection for monocrystalline solar cell interior by electroluminescence image self-comparison method[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 5016011.
- [103] Zhou R J, Edwards C, Popescu G, et al. Semiconductor defect metrology using laser-based quantitative phase imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9336: 93361I.
- [104] Schmalfluss H, Schulmeyer T, Heumann J, et al. Sensitivity comparison of fast integrated die-to-die T+R pattern inspection, standard database inspection, and STARlight2 contamination mode for application in mask production[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6730: 673025.
- [105] Attota R, Germer T A, Silver R M. Through-focus scanning-optical-microscope imaging method for nanoscale dimensional analysis[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(17):

- 1990-1992.
- [106] Noguez C. Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(10): 3806-3819.
- [107] Gozhenko V V, Grechko L G, Whites K W. Electrodynamics of spatial clusters of spheres: substrate effects[J]. *Physical Review B*, 2003, 68(12): 125422.
- [108] Ryabko M, Shchekin A, Koptyaev S, et al. Through-focus scanning optical microscopy (TSOM) considering optical aberrations: practical implementation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32215-32221.
- [109] Peng R, Qu Y, Hao J, et al. Multiple parametric nanoscale measurements with high sensitivity based on through-focus scanning optical microscopy[J]. *Journal of Microscopy*, 2019, 274(3): 139-149.
- [110] Ryabko M V, Koptyaev S N, Shcherbakov A V, et al. Method for optical inspection of nanoscale objects based upon analysis of their defocused images and features of its practical implementation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24483-24489.
- [111] Attota R K, Kang H. Parameter optimization for through-focus scanning optical microscopy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14915-14924.
- [112] Attota R K. Through-focus scanning optical microscopy applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10677: 106770R.
- [113] Lee J H, Na S, Jeong J, et al. Comparative near infrared through-focus scanning optical microscopy for 3D memory subsurface defect detection and classification[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11611: 116110T.
- [114] Joo J Y, Lee J H, Jang W H, et al. Defect height estimation via model-less TSOM under optical resolution [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27508-27520.
- [115] Lee J H, You B G, Park S W, et al. Motion-free TSOM using a deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16352-16362.
- [116] Ren H W, Wu S T. Variable-focus liquid lens by changing aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 211107.
- [117] Attota R. Through-focus or volumetric type of optical imaging methods: a review[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(7): 070901.
- [118] Mishchenko M I. Gustav Mie and the fundamental concept of electromagnetic scattering by particles: a perspective[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(14/15/16): 1210-1222.
- [119] Li X C, Min X, Liu D D. Rayleigh approximation for the scattering of small partially charged sand particles[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2014, 31(7): 1495-1501.
- [120] Tompkins H G, Irene E A. *Handbook of ellipsometry* [M]. New York: William Andrew, 2005.
- [121] Pham H V, Bhaduri B, Tangella K, et al. Real time blood testing using quantitative phase imaging[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e55676.
- [122] Okamoto R, Tahara T. Precision limit for simultaneous phase and transmittance estimation with phase-shifting interferometry[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(3): 033521.
- [123] Ishikawa K, Tanigawa R, Yatabe K, et al. Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 991-994.
- [124] Tahara T, Quan X Y, Otani R, et al. Digital holography and its multidimensional imaging applications: a review [J]. *Microscopy*, 2018, 67(2): 55-67.
- [125] Javidi B, Carnicer A, Anand A, et al. Roadmap on digital holography[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35078-35118.
- [126] Trivedi V, Joglekar M, Mahajan S, et al. Digital holographic imaging of refractive index distributions for defect detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 439-446.
- [127] Lai G M, Yatagai T. Generalized phase-shifting interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(5): 822-827.
- [128] Popescu G, Ikeda T, Dasari R R, et al. Diffraction phase microscopy for quantifying cell structure and dynamics[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 775-777.
- [129] Curl C L, Bellair C J, Harris P J, et al. Quantitative phase microscopy: a new tool for investigating the structure and function of unstained live cells[J]. *Clinical and experimental pharmacology and physiology*, 2004, 31(12): 896-901.
- [130] Zhou R J, Edwards C, Arbabi A, et al. Detecting 20 nm wide defects in large area nanopatterns using optical interferometric microscopy[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(8): 3716-3721.
- [131] Edwards C, Arbabi A, Popescu G, et al. Optically monitoring and controlling nanoscale topography during semiconductor etching[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(9): e30.
- [132] Edwards C, Zhou R J, Hwang S W, et al. Diffraction phase microscopy: monitoring nanoscale dynamics in materials science[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): G33-G43.
- [133] Zhou R J, Edwards C, Popescu G, et al. Diffraction phase microscopy for wafer inspection[C]//*IEEE Photonics Conference 2012, September 23-27, 2012, Burlingame, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 644-645.*
- [134] Zhou R J, Popescu G, Goddard L L. 22 nm node wafer inspection using diffraction phase microscopy and image post-processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8681: 86810G.
- [135] Zhou R J, Edwards C, Bryniarski C A, et al. 9 nm node wafer defect inspection using three-dimensional scanning, a 405 nm diode laser, and a broadband source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9424: 942416.
- [136] Pham H, Bhaduri B, Ding H F, et al. Spectroscopic diffraction phase microscopy[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3438-3440.
- [137] Zhu J L, Liu Y N, Yu X, et al. Sensing sub-10 nm wide perturbations in background nanopatterns using optical

- pseudoelectrodynamics microscopy (OPEM) [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5347-5355.
- [138] Goddard L L. Detecting nanoscale perturbations using new forms of optical microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11783: 1178303.[LinkOut]
- [139] Zuo C, Chen Q, Qu W J, et al. High-speed transport-of-intensity phase microscopy with an electrically tunable lens[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24060-24075.
- [140] Zhu J L, Zhou R J, Zhang L N, et al. Regularized pseudo-phase imaging for inspecting and sensing nanoscale features[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6719-6733.
- [141] Roichman Y, Sun B, Roichman Y, et al. Optical forces arising from phase gradients[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013602.
- [142] Young G, Kukura P. Interferometric scattering microscopy[J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2019, 70: 301-322.
- [143] Patel D, Hanrahan J, Lim K, et al. Defect metrology challenges for the 45-nm technology node and beyond[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6152: 615207.
- [144] Harada M, Minekawa Y, Nakamae K. Defect detection techniques robust to process variation in semiconductor inspection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(3): 035402.
- [145] Zhu J L, Liu S Y, Jiang H, et al. Improved deep-etched multilayer grating reconstruction by considering etching anisotropy and abnormal errors in optical scatterometry [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 471-474.
- [146] Zhu J L, Liu S Y, Chen X G, et al. Robust solution to the inverse problem in optical scatterometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 22031-22042.
- [147] Dong Z Q, Gu H G, Zhu J L, et al. Nonuniform depolarization properties of typical nanostructures and potential applications[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1910-1913.
- [148] Dong Z Q, Chen X G, Wang X Z, et al. Dependence-analysis-based data-refinement in optical scatterometry for fast nanostructure reconstruction[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4091.
- [149] Zhu J L, Shi Y T, Goddard L L, et al. Application of measurement configuration optimization for accurate metrology of sub-wavelength dimensions in multilayer gratings using optical scatterometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6844-6849.
- [150] Zhu J L, Jiang H, Shi Y T, et al. Improved nanostructure reconstruction by performing data refinement in optical scatterometry[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(1): 015605.
- [151] Chen X G, Du W C, Yuan K, et al. Development of a spectroscopic Mueller matrix imaging ellipsometer for nanostructure metrology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 053707.
- [152] Wang C, Chen X G, Gu H G, et al. On the limits of low-numerical-aperture imaging scatterometry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8445-8462.
- [153] Chen C, Chen X G, Gu H G, et al. Calibration of polarization effect of a high-numerical-aperture objective lens with Mueller matrix polarimetry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(2): 025201.
- [154] Chen C, Chen X G, Wang C, et al. Imaging Mueller matrix ellipsometry with sub-micron resolution based on back focal plane scanning[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32712-32727.
- [155] Chen C, Chen X G, Shi Y T, et al. Metrology of nanostructures by tomographic Mueller-matrix scatterometry [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2583.
- [156] Hong X, van Dijk E M P H, Hall S R, et al. Background-free detection of single 5 nm nanoparticles through interferometric cross-polarization microscopy[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 541-547.
- [157] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [158] Hayenga W E, Parto M, Ren J H, et al. Direct generation of tunable orbital angular momentum beams in microring lasers with broadband exceptional points[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 1895-1901.
- [159] Shao Z K, Zhu J B, Chen Y J, et al. Spin-orbit interaction of light induced by transverse spin angular momentum engineering[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 926.
- [160] Yang Y J, Zhao Q, Liu L L, et al. Manipulation of orbital-angular-momentum spectrum using pinhole plates [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(6): 064007.
- [161] Xie Z W, Lei T, Li F, et al. Ultra-broadband on-chip twisted light emitter for optical communications[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 18001.
- [162] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [163] Stav T, Faerman A, Maguid E, et al. Quantum entanglement of the spin and orbital angular momentum of photons using metamaterials[J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1101-1104.
- [164] Wang B, Tanksalvala M, Zhang Z, et al. Coherent Fourier scatterometry using orbital angular momentum beams for defect detection[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3342-3358.
- [165] Wen Y H, Chremmos I, Chen Y J, et al. Arbitrary multiplication and division of the orbital angular momentum of light[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(21): 213901.
- [166] Aboushelbaya R, Glize K, Savin A F, et al. Orbital angular momentum coupling in elastic photon-photon scattering[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(11): 113604.
- [167] Guo K, Bian Z, Dong S, et al. Microscopy illumination engineering using a low-cost liquid crystal display[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(2): 574-579.
- [168] Doiron B, Mota M, Wells M P, et al. Quantifying

- figures of merit for localized surface plasmon resonance applications: a materials survey[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 240-259.
- [169] Huttunen M J, Rasekh P, Boyd R W, et al. Using surface lattice resonances to engineer nonlinear optical processes in metal nanoparticle arrays[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(5): 053817.
- [170] Zhu A N, Gao R X, Zhao X Y, et al. Site-selective growth of Ag nanoparticles controlled by localized surface plasmon resonance of nanobowl arrays[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(14): 6576-6583.
- [171] Li R Y, Tu W W, Wang H S, et al. Near-infrared light excited and localized surface plasmon resonance-enhanced photoelectrochemical biosensing platform for cell analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(15): 9403-9409.
- [172] Debu D T, Yan Q G, Darweesh A A, et al. Broad range electric field enhancement of a plasmonic nanosphere heterodimer[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(7): 1704-1713.
- [173] Li Y F, Dong F X, Chen Y, et al. As-grown graphene/copper nanoparticles hybrid nanostructures for enhanced intensity and stability of surface plasmon resonance[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37190.
- [174] Lee W, Lee S Y, Briber R M, et al. Self-assembled SERS substrates with tunable surface plasmon resonances [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(18): 3424-3429.
- [175] Rivas J G, Sánchez-Gil J A, Kuttge M, et al. Optically switchable mirrors for surface plasmon polaritons propagating on semiconductor surfaces[J]. *Physical Review B*, 2006, 74(24): 245324.
- [176] Shubina T V, Gippius N A, Shalygin V A, et al. Terahertz radiation due to random grating coupled surface plasmon polaritons[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(16): 165312.
- [177] Yang T, Xin J S, Zhu Y Y, et al. Spectrum analysis of bio-chemical thin films on the surface of a semiconductor by terahertz surface plasmon polaritons[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(6): 667-671.
- [178] Yang T, Ge J, Li X, et al. Non-destructive plasma frequency measurement for a semiconductor thin film using broadband surface plasmon polaritons[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 926-929.
- [179] Yang T, Li Y Y, Stantchev R, et al. Detection of defects on the surface of a semiconductor by terahertz surface plasmon polaritons[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4139-4144.
- [180] Saxler J, Rivas J G, Janke C, et al. Time-domain measurements of surface plasmon polaritons in the terahertz frequency range[J]. *Physical Review B*, 2004, 69(15): 155427.
- [181] Isaac T H, Barnes W L, Hendry E. Determining the terahertz optical properties of subwavelength films using semiconductor surface plasmons[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(24): 241115.
- [182] Zhang L L, Karpowicz N, Zhang C L, et al. Terahertz real-time imaging for nondestructive detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6840: 68400Y.
- [183] Johnson B R. Calculation of light scattering from a spherical particle on a surface by the multipole expansion method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(2): 326-337.
- [184] Zontak M, Cohen I. Defect detection in patterned wafers using multichannel scanning electron microscope[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(8): 1511-1520.
- [185] Yoon J W, Ma S M, Kim G P, et al. Nanophotonic identification of defects buried in three-dimensional NAND flash memory devices[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(1): 60-67.
- [186] Poddubny A, Iorsh I, Belov P, et al. Hyperbolic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 948-957.
- [187] Chen R, Lee Y H, Zhan T, et al. Multistimuli-responsive self-organized liquid crystal Bragg gratings[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(9): 1900101.
- [188] Wu F, Lu G, Guo Z W, et al. Redshift gaps in one-dimensional photonic crystals containing hyperbolic metamaterials[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(6): 064022.
- [189] Huo P C, Zhang S, Liang Y Z, et al. Hyperbolic metamaterials and metasurfaces: fundamentals and applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801616.
- [190] Green M A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(11): 1305-1310.
- [191] Spence S, Lee W K, Lin F, et al. Transmission X-ray microscopy and its applications in battery material research—a short review[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(44): 1305-1310.
- [192] Holler M, Diaz A, Guizar-Sicairos M, et al. X-ray ptychographic computed tomography at 16 nm isotropic 3D resolution[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3857.
- [193] Odstreil M, Holler M, Raabe J, et al. High resolution 3D imaging of integrated circuits by X-ray ptychography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10656: 106560U.
- [194] Dierolf M, Menzel A, Thibault P, et al. Ptychographic X-ray computed tomography at the nanoscale[J]. *Nature*, 2010, 467(7314): 436-439.
- [195] Holler M, Guizar-Sicairos M, Tsai E H R, et al. High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 402-406.
- [196] Holler M, Odstreil M, Guizar-Sicairos M, et al. Three-dimensional imaging of integrated circuits with macro- to nanoscale zoom[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(10): 464-470.
- [197] Tanksalvala M, Porter C L, Esashi Y, et al. Nondestructive, high-resolution, chemically specific 3D nanostructure characterization using phase-sensitive EUV imaging reflectometry[J]. *Science Advances*, 2021, 7(5): eabd9667.
- [198] Eberle A L, Mikula S, Schalek R, et al. High-resolution, high-throughput imaging with a multibeam scanning electron microscope[J]. *Journal of Microscopy*,

- 2015, 259(2): 114-120.
- [199] Kemen T, Malloy M, Thiel B, et al. Further advancing the throughput of a multi-beam SEM[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9424: 94241U.
- [200] Keller A L, Zeidler D, Kemen T. High throughput data acquisition with a multi-beam SEM[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9236: 92360B.
- [201] Eberle A L, Schalek R, Lichtman J W, et al. Multiple-beam scanning electron microscopy[J]. *Microscopy Today*, 2015, 23(2): 12-19.
- [202] Thiel B, Mukhtar M, Quoi K, et al. Patterned wafer inspection with multi-beam SEM technology[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2016, 22(S3): 586-587.
- [203] Eberle A L, Zeidler D. Multi-beam scanning electron microscopy for high-throughput imaging in connectomics research[J]. *Frontiers in Neuroanatomy*, 2018, 12: 112.
- [204] Thiel B, Lercel M, Bunday B, et al. Assessing the viability of multi-electron beam wafer inspection for sub-20 nm defects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9236: 92360E.
- [205] Bunday B D, Mukhtar M, Quoi K, et al. Simulating massively parallel electron beam inspection for sub-20 nm defects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9424: 94240J.
- [206] Kemen T, Garbowski T, Zeidler D. Multi-beam SEM technology for ultra-high throughput[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9658: 965807.
- [207] Neumann J T, Garbowski T, Högele W, et al. High-throughput multi-beam SEM: quantitative analysis of imaging capabilities at IMEC-N10 logic node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10145: 101451S.
- [208] Neumann J T, Srikantha A, Hühwohl P, et al. Defect detection and classification on imec iN5 node BEoL test vehicle with MultiSEM[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12053: 120530I.
- [209] Ma E, Chou K, Ebert M, et al. Multiple beam inspection (MBI) for 7 nm node and beyond: technologies and applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10959: 109591R.
- [210] Ren W M, Liu X D, Hu X R, et al. Multi-beam technology for defect inspection of wafer and mask[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11177: 111770D.
- [211] Ma E L, Ren W M, Luo X N, et al. Multi-beam Inspection (MBI) development progress and applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11325: 113250F.
- [212] Shimizu Y, Lu W J, Ohba Y, et al. Feasibility study on the concept of thermal contact sensor for nanometre-level defect inspections on smooth surfaces[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 064006.
- [213] Shimizu Y, Matsuno Y, Chen Y L, et al. Design and testing of a micro-thermal sensor probe for nondestructive detection of defects on a flat surface[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2018, 1(1): 45-57.
- [214] Shimizu Y, Ohba Y, Gao W. Design of fabrication process of a thermal contact sensor for surface defect inspection[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2014, 8(4): JAMDMS0052.
- [215] Nativ A, Feldman H, Shaked N T. Wafer defect detection by a polarization-insensitive external differential interference contrast module[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3534-3538.
- [216] Geng H, Yang F, Zeng X, et al. When wafer failure pattern classification meets few-shot learning and self-supervised learning[C]//2021 IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design (ICCAD), November 1-4, 2021, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2021.
- [217] Church J, Austin B, Meli L, et al. A holistic characterization methodology for stochastic printing failures in EUV contact holes[C]//2021 32nd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), May 10-12, 2021, Milpitas, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [218] Das S, Kang S K, Halder S, et al. Massive metrology of 2D logic patterns on BEOL EUVL[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11325: 113250J.
- [219] Chou P B, Rao A R, Sturzenbecker M C, et al. Automatic defect classification for semiconductor manufacturing[J]. *Machine Vision and Applications*, 1997, 9(4): 201-214.
- [220] Henn M A, Barnes B M, Zhou H, et al. Optimizing defect detectability across multiple ultraviolet wavelengths [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10585: 105850A.
- [221] Singh S, Khokale S, Xie Q, et al. Utilizing single scan and enhanced design-based binning methodologies for improved process window and hotspot discovery[C]//2019 30th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), May 6-9, 2019, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [222] Lin Y Y, Tsai F S, Hsu L C, et al. Fast and accurate defect classification for CMP process monitoring[C]//2019 30th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), May 6-9, 2019, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [223] Chen Y Q, Shu Z W, Zhang S, et al. Sub-10 nm fabrication: methods and applications[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(3): 032002.
- [224] Quhe R G, Xu L, Liu S, et al. Sub-10 nm two-dimensional transistors: theory and experiment[J]. *Physics Reports*, 2021, 938: 1-72.
- [225] Hsu C H, Ho C S, Yang G, et al. Managing defects in DRAM stack capacitors using in-line e-beam inspection [J]. *Solid State Technology*, 2007, 50(3): 52-53.
- [226] Osten W, Haist T, Manske E. How to drive an optical measurement system to outstanding performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10557: 10557.
- [227] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [228] Wang T, Chen Y, Qiao M N, et al. A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9): 3465-3471.

- [229] Patel D V, Bonam R K, Oberai A A. Deep learning-based detection, classification, and localization of defects in semiconductor processes[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2020, 19(2): 024801.
- [230] Wu K H, Chen Z G, Li W. A novel intrusion detection model for a massive network using convolutional neural networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 50850-50859.
- [231] LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(11): 2278-2324.
- [232] 邢鑫, 史峥. 基于卷积神经网络的晶圆缺陷检测与分类算法[J]. *计算机工程*, 2018, 44(8): 218-223.
Fang X, Shi Z. Wafer defect detection and classification algorithms based on convolutional neural network[J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(8): 218-223.
- [233] 杨静, 尚夏, 荣海军, 等. 采用仿射迭代最近点的晶圆分割方法[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(12): 56-61.
Yang J, Shang X, Rong H J, et al. A wafer segmentation method using the closest affine iterative point[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(12): 56-61.
- [234] Chien J C, Wu M T, Lee J D. Inspection and classification of semiconductor wafer surface defects using CNN deep learning networks[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(15): 5340.
- [235] Cheon S, Lee H K, Kim C O, et al. Convolutional neural network for wafer surface defect classification and the detection of unknown defect class[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2019, 32(2): 163-170.
- [236] Pan J M, Low K L, Ghosh J, et al. Transfer learning-based artificial intelligence-integrated physical modeling to enable failure analysis for 3 nanometer and smaller silicon-based CMOS transistors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(7): 6903-6915.
- [237] Hsu C Y, Chien J C. Ensemble convolutional neural networks with weighted majority for wafer Bin map pattern classification[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, 33(3): 831-844.
- [238] Henn M A, Zhou H, Barnes B M. Data-driven approaches to optical patterned defect detection[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(9): 2683-2693.
- [239] Okuda H, Hiroi T. Robust defect detection method using reference image averaging for high-throughput SEM wafer pattern inspection system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6152: 61524F.
- [240] Oh J H, Kwon G, Mun D Y, et al. Application of review-SEM to high-resolution inspection for 3x nm nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8324: 83242P.
- [241] Levi S, Schwartzband I, Khristo S, et al. SEM simulation for 2D and 3D inspection metrology and defect review[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9051: 90510B.
- [242] de Bisschop P, Hendrickx E. Stochastic printing failures in EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10957: 109570E.
- [243] Ouchi M, Ishikawa M, Shinoda S, et al. A trainable die-to-database for fast e-beam inspection: learning normal images to detect defects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11325: 113252F.
- [244] Kitamura T, Kubota K, Hasebe T, et al. Introduction of a die-to-database verification tool for the entire printed geometry of a die: geometry verification system NGR2100 for DFM[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5756: 73-84.
- [245] Luoh T, Yang L W, Yang T, et al. Process window optimization by die to database e beam inspection[C]//2018 e-Manufacturing & Design Collaboration Symposium (eMDC), September 7, 2018, Hsinchu, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [246] Nakamae K. Electron microscopy in semiconductor inspection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(5): 052003.
- [247] Kondo T, Ban N M, Ebizuka Y, et al. Massive metrology and inspection solution for EUV by area inspection SEM with machine learning technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11611: 1161111.
- [248] Wang F, Zhang P C, Fang W, et al. Process window and defect monitoring using high-throughput e-beam inspection guided by computational hot spot detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97783F.
- [249] Strojwas A J, Brozek T, Doong K, et al. Novel E-beam techniques for inspection and monitoring[C]//2022 6th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference, March 6-9, 2022, Oita, Japan. New York: IEEE Press, 2022: 135-137.
- [250] Patterson O D, Lee J L, Monkowski M D, et al. E-beam inspection system for comparison of wafer and design data[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8324: 83242J.
- [251] Zhu J L, Udupa A, Goddard L L. Visualizable detection of nanoscale objects using anti-symmetric excitation and non-resonance amplification[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2754.